

FACULDADE DE ENGENHARIA UNIVERSIDADE DO PORTO

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORIZAÇÃO E  
CONTROLO PARA ENSAIOS TRIAXIAIS DE SOLOS**

**Carlos Filipe Gomes da Costa**

Licenciado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores pela Faculdade  
de Engenharia da Universidade do Porto

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de mestre  
em

**Automação, Instrumentação e Controlo**

Dissertação realizada sob a supervisão de:

- Orientador – Professor Doutor Joaquim Gabriel Magalhães Mendes do Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto
- Coorientador – Professor Doutor António Joaquim Pereira Viana da Fonseca do Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Porto, 21 de Fevereiro de 2008



## ***Agradecimentos***

Gostaria de agradecer a todas a pessoas que de alguma forma ajudaram a finalizar este projecto pessoal. Entre todas essas pessoas saliento as seguintes:

- Prof. Dr. Joaquim Mendes pela sua orientação, em especial a ajuda na fase final;
- Prof. Dr. Viana da Fonseca pela possibilidade de realização de todo o trabalho no Laboratório de Geotecnia;
- Aos colegas e professores do Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo pelas ajudas pontuais;
- Às pessoas que convivi no Laboratório entre eles, Prof. António Topa Gomes, Eng. Cristiana Ferreira, Eng. Saturnino Chembeze, Eng. Sara Rios e em especial pelo apoio e camaradagem ao Sr. Armando Pinto.



## **Resumo**

Esta dissertação apresenta sucintamente o trabalho desenvolvido no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto para a monitorização e o controlo de ensaios triaxiais de solos.

Foi proposto o desenvolvimento de um sistema de monitorização e controlo de ensaios triaxiais clássicos, contudo no decorrer do trabalho foi também desenvolvido um sistema para monitorização e controlo de ensaios triaxiais verdadeiros satisfazendo assim outras necessidades similares do laboratório.

Para a monitorização e o controlo do equipamento dos ensaios triaxiais verdadeiros foi desenvolvida uma aplicação em *LabVIEW*. Actualmente, não existem aplicações comerciais deste tipo.

No caso do triaxial clássico, além do software específico, foram desenvolvidas também placas electrónicas baseadas num microcontrolador, possibilitando a interligação do software com os motores passo-a-passo e dos outros equipamentos.

Com os sistemas desenvolvidos, o laboratório ficou equipado com duas plataformas de ensaios, totalmente monitorizadas e controladas, aumentando o leque dos equipamentos disponíveis para a realização de ensaios geotécnicos. Estes equipamentos reforçam a liderança em Portugal da investigação na área de ensaios geotécnicos no Laboratório de Geotecnia da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



## ***Abstract***

This dissertation presents the work developed at Geotechnical Laboratory of the Faculty of Engineer of University of Porto for the monitoring and the control of triaxial soil tests.

It was propose the development of a system for monitoring and control of classical triaxial soil tests, however during the work it was developed one more system to monitoring and control true triaxial soil tests, filing other lab requirements.

To the monitoring and control of the equipment of the true triaxial tests, it was developed an application in *LabVIEW*. Actually, there aren't any commercial applications to this kind of systems.

In the classical triaxial tests, besides the software, it was developed hardware: specific electronic boards based on a microcontroller, allowing the connection of the software with the stepper motors and others equipments.

With the developed systems, the laboratory became equipped with two platforms of triaxial tests, totally monitored and controlled, increasing the number of equipment available to the geotechnical tests held on the laboratory. These developments highlight the leadership in Portugal of the investigation at the geotechnical area of Laboratory of the Faculty of Engineer of University of Porto for the monitoring and the control of triaxial soil tests.





*“Caminhante, não há caminho.  
O caminho faz-se caminhando”*

*António Machado*



# Índice

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJECTIVO.....	1
1.2	RESUMO DOS CAPÍTULOS DA DISSERTAÇÃO .....	2
<b>2</b>	<b>ENSAIOS TRIAXIAIS DE SOLOS .....</b>	<b>3</b>
2.1	INTRODUÇÃO .....	3
2.2	EQUIPAMENTOS USADOS NOS ENSAIOS .....	10
2.2.1	<i>Transdutores .....</i>	<i>10</i>
2.2.2	<i>Módulos de Aquisição de Dados .....</i>	<i>14</i>
2.2.3	<i>Actuadores .....</i>	<i>16</i>
2.2.4	<i>Software .....</i>	<i>23</i>
<b>3</b>	<b>MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DO ENSAIO TRIAXIAL VERDADEIRO .....</b>	<b>25</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	25
3.2	SOLUÇÃO DE CONTROLO .....	26
3.2.1	<i>Hardware Utilizado .....</i>	<i>26</i>
3.3	APLICAÇÃO DESENVOLVIDA .....	28
3.4	PROGRAMAÇÃO EM LABVIEW .....	34
3.4.1	<i>Inicialização de variáveis.....</i>	<i>34</i>
3.4.2	<i>Envio de Ordens.....</i>	<i>34</i>
3.4.3	<i>Leitura e Visualização de Dados.....</i>	<i>38</i>
3.5	RESULTADOS OBTIDOS .....	40
<b>4</b>	<b>MONITORIZAÇÃO E CONTROLO DO ENSAIO TRIAXIAL CLÁSSICO .....</b>	<b>43</b>
4.1	COMANDO DOS MPP .....	46
4.1.1	<i>Programa Implementado no <math>\mu</math>C.....</i>	<i>47</i>
4.1.2	<i>Placas Circuito Impresso Desenvolvidas.....</i>	<i>57</i>
4.1.3	<i>Funcionamento do Sistema de Comando dos MPP.....</i>	<i>59</i>
4.2	APLICAÇÃO LABVIEW.....	62
4.2.1	<i>Interfaces da Aplicação .....</i>	<i>63</i>
4.2.3	<i>Programação em LabVIEW .....</i>	<i>67</i>
4.3	CONTROLO DOS ACTUADORES.....	74
4.4	COMANDO DOS ACTUADORES ‘SAIC’ .....	74
4.4.1	<i>Análise da Pressão .....</i>	<i>75</i>
4.4.2	<i>Análise do Caudal.....</i>	<i>78</i>

4.5	PROJECTO DO CONTROLADOR .....	81
4.5.1	<i>Caracterização do Sistema</i> .....	82
4.5.2	<i>Resposta do Sistema</i> .....	88
4.6	RESULTADOS OBTIDOS .....	92
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>97</b>
5.1	DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....	98
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>99</b>
	<b>ANEXOS .....</b>	<b>100</b>
ANEXO.1	FORMULAS ENSAIOS TRIAXIAIS CLÁSSICOS .....	100
ANEXO.2	CIRCUITOS ELECTRÓNICOS DAS PLACAS DESENVOLVIDAS.....	102
ANEXO.3	LIGAÇÕES ELÉCTRICAS DO SISTEMA TRIAXIAL CLÁSSICO .....	104

# Índice de Figuras

FIG. 1: TORRE DE PISA.....	3
FIG. 2: ESQUEMA DE UMA CÂMARA TRIAXIAL .....	6
FIG. 3: CÂMARA PARA ENSAIOS TRIAXIAIS VERDADEIROS.....	9
FIG. 4: ESQUEMA DE UM LVDT .....	10
FIG. 5: LVDT .....	11
FIG. 6: LDT.....	11
FIG. 7: TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO POTENCIOMÉTRICO.....	12
FIG. 8: ESQUEMA DO MEDIDOR DE VOLUME .....	12
FIG. 9: MEDIDOR DE VOLUME .....	12
FIG. 10: CÉLULA DE CARGA .....	13
FIG. 11: TRANSDUTOR DE PRESSÃO .....	14
FIG. 12: DATASCAN 7021 .....	14
FIG. 13: CARTA DE AQUISIÇÃO NI PCI-6221 .....	16
FIG. 14: ACTUADOR 'SAIC' .....	17
FIG. 15: DESENHO EM 3D DO ACTUADOR 'SAIC' .....	18
FIG. 16: CONTROLADOR DE PRESSÃO STDDPC DA GDS .....	19
FIG. 17: DIAGRAMA DE CONTROLO GDS .....	19
FIG. 18: WFI TriTECH 50 kN .....	20
FIG. 19: ELE 100 kN .....	21
FIG. 20: ACTUADOR PNEUMÁTICO ADQUIRIDO .....	22
FIG. 21: ESQUEMA DAS LIGAÇÕES HIDRÁULICAS DO CUBO.....	25
FIG. 22: TRANSDUTOR DE DEFORMAÇÃO E CUBO TRIAXIAL.....	27
FIG. 23: SEPARADOR GDS.....	29
FIG. 24: SEPARADOR PARA INSERIR NOVAS ORDENS .....	31
FIG. 25: APRESENTAÇÃO DOS VALORES DE PRESSÃO E VOLUME DOS ACTUADORES GDS .....	32
FIG. 26: APLICAÇÃO DO ENSAIO TRIAXIAL VERDADEIRO.....	33
FIG. 27: ENVIO DE ORDENS SIMPLES.....	35
FIG. 28: ALGORITMO DE CONTROLO SIMPLIFICADO .....	36
FIG. 29: CÓDIGO DE CONTROLO DO ENSAIO .....	37
FIG. 30: LEITURA DE PRESSÃO E VOLUME .....	38
FIG. 31: LEITURA DE DADOS INTERNOS.....	39
FIG. 32: LEITURA DAS DEFORMAÇÕES .....	39
FIG. 33: CONTROLO EM PRESSÃO NOS TRÊS EIXOS DO CUBO.....	40
FIG. 34: CONTROLO DAS TRAJECTÓRIAS.....	41
FIG. 35: CONTROLO POR DEFORMAÇÃO .....	42
FIG. 36: CÂMARA DE ENSAIOS TRIAXIAL CLÁSSICOS .....	43

FIG. 37: ARQUITECTURA DO SISTEMA .....	44
FIG. 38: DIAGRAMA DE BLOCOS DO SISTEMA .....	46
FIG. 39: DIAGRAMA DE FUNCIONAMENTO DO $\mu C$ .....	48
FIG. 40: DIGRAMA DA AQUISIÇÃO DE DADOS DO PC .....	49
FIG. 41: TRAMA DE SELECÇÃO DE CANAIS .....	49
FIG. 42: TRAMA DE INICIO(A) E FIM(B) DE AQUISIÇÃO .....	50
FIG. 43: PEDIDO DE LEITURA E RESPOSTA DA INFORMAÇÃO DOS CANAIS.....	50
FIG. 44: FLUXOGRAMA ESQUEMÁTICO DA RECEPÇÃO DAS TRAMAS .....	51
FIG. 45: FLUXOGRAMA DA RECEPÇÃO DOS VALORES DOS CANAIS DO DATASCAN.....	55
FIG. 46: FLUXOGRAMA DO ENVIO DE BYTES PELA PORTA SERIE .....	56
FIG. 47: TRAMA DE COMANDO DOS MPP .....	56
FIG. 48: PLACA COM O $\mu C$ .....	58
FIG. 49: PLACA DE ISOLAMENTOS .....	59
FIG. 50: ARMÁRIO ELÉCTRICO .....	60
FIG. 51: PAINEL DE COMANDO MANUAL .....	61
FIG. 52: VISTA GERAL DA APLICAÇÃO .....	62
FIG. 53: CONFIGURAÇÕES DA APLICAÇÃO .....	64
FIG. 54: PAINEL DE CALIBRAÇÃO .....	65
FIG. 55: DEFINIÇÃO DOS ESTADOS DE CONTROLO DO ENSAIO .....	65
FIG. 56: COMANDO MANUAL VIA PC .....	66
FIG. 57: ESQUEMA DO FUNCIONAMENTO GERAL DA APLICAÇÃO .....	67
FIG. 58: CÓDIGO RELATIVO À AQUISIÇÃO DE DADOS .....	68
FIG. 59: COMPONENTES DO ACTUADOR .....	74
FIG. 60: REPRESENTAÇÃO DO ACTUADOR .....	75
FIG. 61: TRANSDUTOR DE PRESSÃO .....	76
FIG. 62: GRÁFICO COM A EVOLUÇÃO DAS PRESSÕES A DIFERENTES VELOCIDADES.....	77
FIG. 63: GRÁFICO COM A RELAÇÃO ENTRE A PRESSÃO E A VELOCIDADE .....	78
FIG. 64: MEDIDOR DE VOLUME.....	78
FIG. 65: VARIAÇÃO DE VOLUME A DIFERENTES VELOCIDADES .....	79
FIG. 66: ACTUADOR PNEUMÁTICO .....	82
FIG. 67: GRÁFICO DE PRESSÃO E DE FORÇA .....	83
FIG. 68: GRÁFICO COM A RELAÇÃO ENTRE A FORÇA E A PRESSÃO.....	84
FIG. 69: ESBOÇO DO COMPENSADOR .....	85
FIG. 70: RESPOSTA DO SISTEMA A DIFERENTES VALORES DE $K_p$ .....	89
FIG. 71: RESPOSTA EM PRESSÃO COM CONTROLADOR .....	90
FIG. 72: RESPOSTA EM FORÇA COM CONTROLADOR .....	90
FIG. 73: MODELO DO SISTEMA .....	91
FIG. 74: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO INTERFACE AR-ÁGUA.....	93

FIG. 75: GRÁFICO COM A EVOLUÇÃO DAS PRESSÕES AO LONGO DE UM ENSAIO .....	94
FIG. 76: GRÁFICO COM O TRAÇADO DE DESCARGAS EFECTUADAS DURANTE UM ENSAIO .....	95
FIG. 77: GRÁFICO DA FORÇA EM FUNÇÃO DO DESLOCAMENTO .....	96
FIG. 78: CIRCUITO DA PLACA DO $\mu$ C .....	102
FIG. 79: CIRCUITO DA PLACA DE ISOLAMENTOS.....	103
FIG. 80: CIRCUITO DO ARMÁRIO ELÉCTRICO .....	104
FIG. 81: LIGAÇÕES DAS FICHAS 'HARTING D' (FÊMEA) DO ARMÁRIO ELÉCTRICO .....	105
FIG. 82: FIG. 83: LIGAÇÕES RS232 ENTRE O ARMÁRIO E O PC.....	105
FIG. 83: LIGAÇÕES RS232 ENTRE O DATASCAN E O PC .....	105





## ***Índice de Tabelas***

TABELA 1: EVOLUÇÃO DOS ESTUDOS GEOTÉCNICOS .....	4
TABELA 2: VARIÁVEIS ADQUIRIDAS DURANTE O ENSAIO.....	8
TABELA 3: GAMAS SUPORTADAS PELO DATASCAN 7000 SERIES .....	15
TABELA 4: GAMAS SUPORTADAS PELA CARTA PCI-6221.....	15
TABELA 5: CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS CONTROLADORES DO TIPO PID .....	81
TABELA 6: ENSAIO TRIAXIAL ILUSTRATIVO .....	92
TABELA 7: VARIÁVEIS DOS ENSAIOS TRIAXIAIS .....	100



## ***Lista de Abreviaturas***

<i>LabGeo</i>	Laboratório de Geotecnia da FEUP.
<i>SAIC</i>	Secção de Automação, Instrumentação e Controlo.
<i>IC</i>	Imperial College
<i>GDS</i>	Fabricante de equipamento de geotecnia.
<i>CUBO</i>	Câmara dos ensaios triaxiais verdadeiros.
<i>DAQ</i>	Dispositivo de aquisição de dados.
<i>μC</i>	Microcontrolador.
<i>DS89C420</i>	Referência do μC do fabricante Dallas.
<i>MAX232</i>	Circuito integrado usada nas comunicações serie.
<i>LM239</i>	Circuito integrado comparador.
<i>I/O</i>	Entrada e saída
<i>MPP</i>	Motor Passo-a-Passo.
<i>bit</i>	Menor unidade de medida de transmissão de dados
<i>byte</i>	Conjunto de 8 bit



## **1 Introdução**

O Laboratório de Geotecnia (LabGeo) da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (<http://paginas.fe.up.pt/sgwww/labgeo>) é líder em Portugal no desenvolvimento de investigação na área de ensaios geotécnicos, incentivando a realização de projectos e teses de mestrado e de doutoramento. Actualmente mantém uma cooperação intensa com diversos grupos de investigação quer em Portugal (IST, FCTUC), quer no estrangeiro, em particular no Reino Unido, Itália, Austrália e Brasil. O LabGeo presta também serviços ao exterior na realização de estudos geotécnicos de amostras de solos.

Para apoio à investigação em curso, foi feito ao longo dos últimos anos um esforço de modernização dos equipamentos existentes no laboratório de modo a permitir a monitorização e/ou controlo a partir de um computador pessoal. Além disso foram também adquiridos diversos equipamentos de ensaio, nomeadamente prensas estáticas e cíclicas, controladores de pressão, diversas câmaras triaxiais e instrumentação de pontes.

### **1.1 Objectivo**

É neste contexto que surgiu a ideia de melhorar umas das plataformas de ensaios triaxiais de solos existente no LabGeo. Este sistema, desenvolvido no início da década de 90 pelo SAIC – FEUP (Secção de Automação, Instrumentação e Controlo da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto) [1][2][3], encontrava-se bastante desactualizado e já não satisfazia as necessidades.

O objectivo deste trabalho é desenvolver um sistema de monitorização e controlo da compressão de uma amostra de solo, aplicando pressão no sentido axial (pela face superior), e radialmente pelo exterior. Desta forma o solo é envolvido por uma membrana impermeável, podendo aplicar-se pressão no interior do solo (designada de pressão neutra). A pressão é em geral imposta através do controlo do movimento dos êmbolos de cilindros associados. De acordo com os requisitos do ensaio, a variável a controlar pode ser

directamente a pressão, ou então a deformação ou a força aplicada. Este tipo de ensaios é bastante demorado, levando em geral várias semanas até ao seu término, sendo por isso importante a monitorização e o controlo automático do sistema via computador (*PC*).

Após uma análise cuidadosa do sistema existente e dos novos requisitos de funcionamento, optou-se por uma solução diferente do que havia sido implementado há um ano, mas aproveitando os actuadores e os respectivos *drivers*. Esta nova solução seria baseada em *PC*, estando o controlo de baixo nível dos actuadores a cargo de uma placa de microcontrolador. Esta placa seria especialmente concebida de modo a permitir a ligação de até quatro actuadores em simultâneo, sendo a comunicação com o *PC* efectuada via porta série.

## **1.2     *Resumo dos Capítulos da Dissertação***

Esta dissertação foi dividida nos seguintes capítulos:

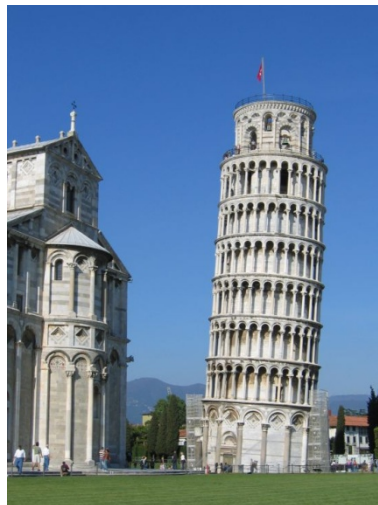
- Capítulo 2: *Ensaaios Triaxiais de Solos*
  - Neste capítulo são apresentados os princípios básicos dos ensaios triaxiais e a teoria necessária para compreender os requisitos do sistema.
- Capítulo 3: *Monitorização e Controlo do Ensaio Triaxial Verdadeiro*
  - Neste capítulo são analisados os requisitos dos ensaios triaxiais verdadeiros, e apresentada a solução implementada e alguns resultados.
- Capítulo 4: *Monitorização e Controlo do Ensaio Triaxial Clássico*
  - Neste capítulo são apresentadas os elementos constituintes dos ensaios triaxiais clássicos, dando-se ênfase ao hardware e à aplicação informática desenvolvidas para a monitorização e controlo do sistema.
- Capítulo 5: *Conclusão*
  - Neste capítulo são apresentadas as conclusões principais deste trabalho, bem como sugestões para desenvolvimentos futuros.

## 2 Ensaaios Triaxiais de Solos

### 2.1 Introdução

Com o passar dos anos, a arquitectura de edifícios tem vindo a ser cada vez mais arrojada exigindo uma análise cuidada da estrutura das construções, o que é fortemente condicionado pelo comportamento das fundações, tanto na vertente da capacidade de carga como nos seus assentamentos.

Um exemplar antigo, apresentado na *Fig. 1*, que demonstra a importância deste tipo de estudos é a *Torre de Pisa*, em Itália. Esta torre, com 56 metros de altura, começou a ser construída em 1150 mas só terminou no ano de 1350. Já durante a sua construção foi detectada uma ligeira inclinação provocada por um assentamento do solo com maior incidência de um dos lados, que tem obrigado a uma monitorização contínua e a algumas intervenções correctivas.



*Fig. 1: Torre de Pisa*

Na *Tabela 1* são apresentados os aspectos mais relevantes da geotecnia que foram sendo estudados ao longo do século XX.

Tabela 1: Evolução dos Estudos Geotécnicos

Década	Avanços Principais	Estado dos ensaios laboratoriais
20s	Desenvolvimento dos conceitos fundamentais da Mecânica de Solos.	Ensaos laboratoriais usados para apoiar conceitos teóricos.
50s	Desenvolvimentos dos conceitos relacionados com a tensão de corte.	Ensaos laboratoriais tornam-se o centro das investigações em geotecnia.
70s	Investigação das características dinâmicas e análise dos dados obtidos em ensaios de campo.	São desenvolvidos novos equipamentos para ensaios laboratoriais e de campo.
80s	Desenvolvimento de modelos matemáticos de solos para cálculos computacionais	O desenvolvimento dos modelos requer mais informação paramétrica
90s	Generaliza-se o uso de novos métodos e materiais como geosintéticos e solos reforçados.	Novos ensaios laboratoriais possibilitam o uso de diferentes materiais e métodos.

As características dos solos podem ser obtidas de diversas formas, por intermédio de ensaios *in-situ* ou em laboratório. É através da correlação entre os dados obtidos de diversos ensaios que se torna possível ter uma caracterização competente do comportamento do solo.

Os ensaios mecânicos laboratoriais incidem particularmente na condução de trajectórias de compressão uniaxial ou triaxial, podendo também ser estáticos ou dinâmicos, sendo os mais simples os que usam dispositivos de propagação de ondas sísmicas nas amostras. Além disso, existe uma grande diversidade de ensaios pensados para situações específicas, logo com trajectórias diversificadas e que melhor representam obras tão diferentes com fundações e grandes escavações a céu aberto, por exemplo: túneis e outras obras subterrâneas, tanto em maciços terrosos como rochosos, ensaios em placas e também ensaios em fendas abertas em maciços rochosos.



Os ensaios laboratoriais podem ser divididos em dois grupos em que num se obtém as características físicas (amostras remexidas) e no outro se obtém as características mecânicas.

As características físicas que são normalmente obtidas são o índice de liquidez, de consistência e de compacidade relativa, para além da análise granulométrica. A análise granulométrica é um processo que visa definir, para determinadas faixas pré-estabelecidas de tamanho de grãos, a percentagem em peso que cada fracção possui em relação à massa total da amostra em análise.

Os ensaios de caracterização mecânica necessitam de mais equipamento para a sua realização. Os mais comuns são a consolidação no édometro, compressão simples, corte directo e os ensaios triaxiais. Estes últimos são os mais completos e que requerem plataformas de monitorização e controlo mais sofisticadas. Os ensaios triaxiais podem ser divididos em Triaxiais Clássicos e Triaxiais Verdadeiros.

Neste trabalho irá ser apresentada uma solução desenvolvida para o controlo e monitorização destes dois tipos de ensaios triaxiais.

Na figura *Fig. 2* está representado um esquema de uma câmara preparada para efectuar um ensaio triaxial clássico. O provete é colocado no centro da câmara e envolvido por uma membrana flexível de látex para o isolar da água envolvente. Depois do enchimento da câmara, e de feita a sua purga o ensaio inicia-se aplicando as pressões pelas entradas representadas na figura.

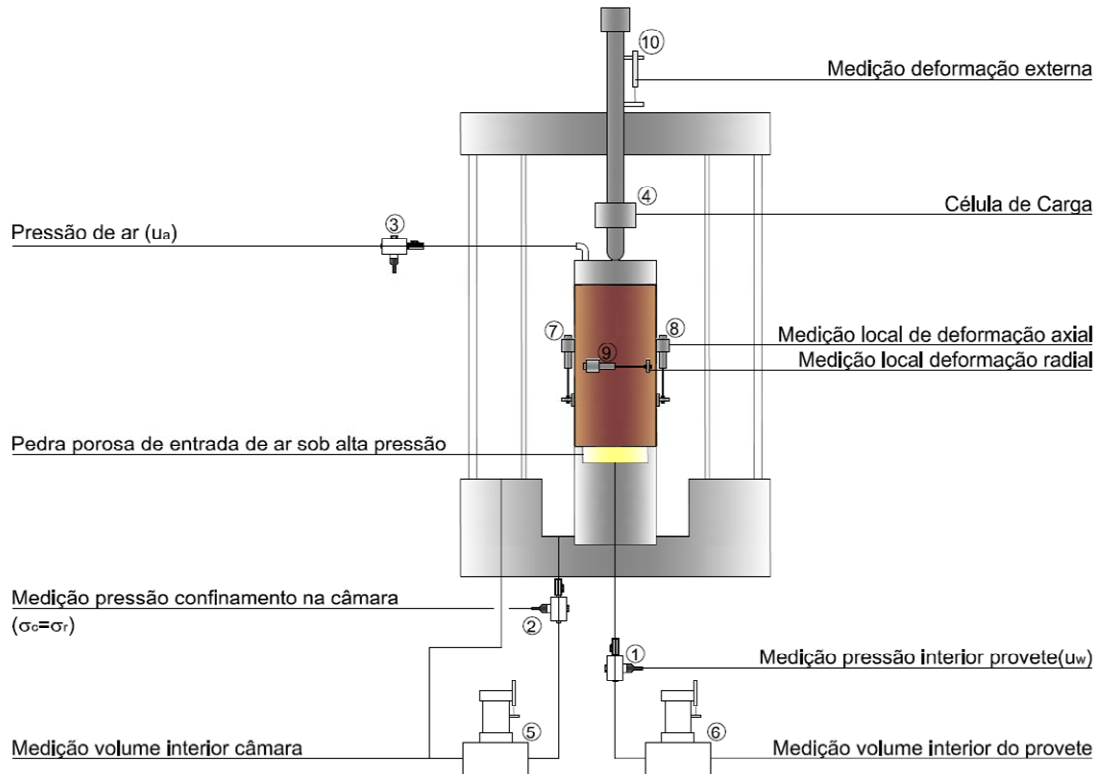


Fig. 2: Esquema de uma Câmara Triaxial

[4]

Nestas câmaras as pressões que actuam sobre a amostra são designadas de: tensão neutra (*back*), de confinamento (*cell*) e axial (resultante da carga transmitida pelo pistão e registada na célula de carga e da tensão de confinamento que se transmite também ao topo do provete). A interacção destas três pressões e a forma como influenciem a amostras permite a realização de diferentes tipos de ensaios (trajectórias de tensões) e a obtenção das características mecânicas dos solos (leis de comportamento tensão-deformação e, por isso, definição da sua deformabilidade e resistência).

Um ensaio triaxial pode ser dividido em três etapas principais: a saturação, a consolidação e o corte.

A primeira etapa do ensaio triaxial consiste na aplicação de uma pressão inicial destinada a saturar o provete de água em todo o seu volume, eliminando assim eventuais bolhas de ar existentes no seu interior. Esta saturação é possível devido às duas ligações da pressão neutra ao provete, uma superior e outra inferior, como pode ser visualizado na Fig. 2. Para isso é utilizada uma

pressão de confinamento superior à neutra que é aplicada pela parte inferior, com a superior aberta para a atmosfera. Assim, ao ser aplicada a pressão por baixo, a água preencherá o provete fazendo com que o ar se evacue pela saída superior. Quando na parte superior começar a aparecer água significa que o solo está saturado. Nesta fase inicial é atingida a condição inicial do provete a ensaiar, sendo possível impor várias condições à amostra de solo. [4]

A consolidação é uma etapa intermédia que consiste em aumentar as pressões aplicadas ao provete de forma controlada, até atingir níveis de tensões de confinamento previamente definidos (que podem ser isotrópicos ou anisotrópicos) e se iniciar a etapa do corte.

A última parte do ensaio, corte, baseia-se na aplicação de uma força axial crescente no provete até o levar à ruptura, sendo controlada a força ou a deformação da amostra.

O utilizador define os valores das entradas a serem aplicadas ao provete, entre eles:

- pressões ou forças iniciais para o ajuste da amostra e o teste de fugas;
- pressões e forças e o intervalo de tempo para a saturação;
- taxa de aumento ou decréscimo de pressões e forças aplicadas durante a consolidação e o corte;
- alarmes e respectiva acção durante o ensaio.

Estes factores são variáveis com o tipo de solo e ensaio a efectuar. O utilizador fornece ainda os dados da amostra no início do ensaio:

- diâmetro ( $D0$ ) e altura ( $H0$ ) da amostra de solo -  $mm$ ;
- massa do solo seco ( $Md$ ) e solo com água ( $Mw$ ) -  $g$ ;
- peso volúmico total ( $Gs$ ) -  $kN/m^3$ .

Existem outras variáveis que são obtidas recorrendo a equipamento de aquisição apresentadas na *Tabela 2*.

Tabela 2: Variáveis Adquiridas Durante o Ensaio

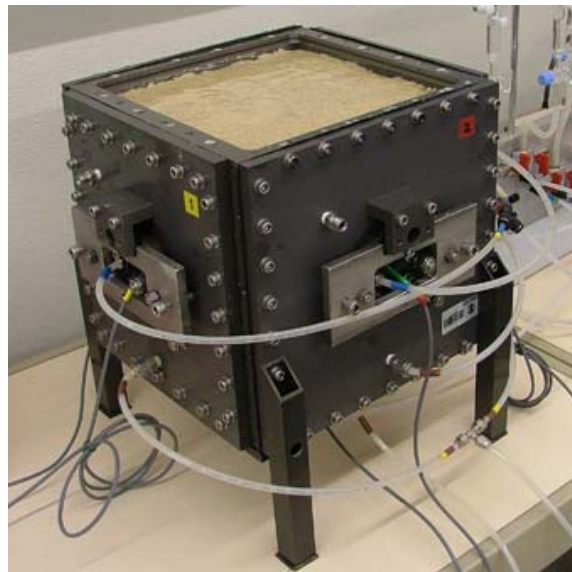
Parâmetro	Nomenclatura	Unidade	Transdutor
Força	<i>load</i>	N	Célula de Carga
Deformação	<i>displacement</i>	mm	LVDT
Variação Volumétrica	<i>VolumeChange</i>	cm <sup>3</sup>	Medidor de Volume
Pressão Interna	<i>back</i>	kPa	Transdutor de Pressão
Pressão de Confinamento	<i>cell</i>	kPa	Transdutor de Pressão
Pressão Axial	<i>ram</i>	kPa	Transdutor de Pressão

O controlo do ensaio é efectuado tendo como base estas variáveis, e outras calculadas através destas, apresentadas na *Tabela 7* em anexo. Com estas variáveis o utilizador pode definir as condições do ensaio a partir de diferentes estados de controlo, seguindo o perfil de evolução desejado.

Existem hoje várias aplicações desenvolvidas para o controlo e a monitorização de ensaios triaxiais. Embora o nicho de mercado não seja ainda muito alargado, cada fabricante disponibiliza as suas tecnologias, com preços pouco convidativos. Outro aspecto negativo é o facto de muitas destas aplicações funcionarem só com o equipamento do respectivo fornecedor.

Uma ferramenta disponível em diversos Laboratórios de Geotecnia que desenvolvem investigação nesta área, caracterizada por ser bastante flexível é o 'TRIAX' desenvolvido pelo Prof. David Toll da universidade de Durham. Embora a versão disponível no Laboratório de Geotecnia da FEUP não seja a mais recente, e tenha uma interface bastante elementar, tem cumprido as exigências dos ensaios triaxiais efectuados.

Para além destes ensaios laboratoriais que são os mais usuais, tem vindo também a ser desenvolvida investigação – esta é uma área de patente internacional – no âmbito dos ensaios triaxiais verdadeiros (ver *Fig. 3*). Estes ensaios permitem obter uma melhor caracterização dos solos, já que possibilitam o controlo independente dos três eixos ortogonais.



*Fig. 3: Câmara para ensaios Triaxiais Verdadeiros*

Devido ao interesse na investigação deste tipo de equipamento por parte da FEUP, foi, no âmbito deste trabalho, desenvolvida uma aplicação em *LabVIEW* para o controlo e a monitorização destes sistemas. Além do controlo das pressões nas faces do *CUBO* (câmara para ensaios triaxiais verdadeiros), é ainda possível ao utilizador fazer um controlo por deformação da amostra.[5]

Na secção seguinte serão descritos resumidamente os equipamentos que são habitualmente utilizados nos ensaios triaxiais de solos.

## 2.2 Equipamentos Usados nos Ensaio

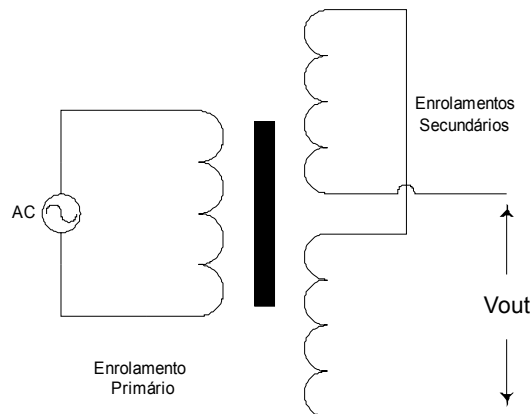
Qualquer que seja o ensaio triaxial, existe sempre a necessidade de monitorizar e controlar um conjunto de variáveis, bem como processar a informação adquirida. Para este efeito utiliza-se habitualmente um sistema de aquisição de dados, transdutores e actuadores.

### 2.2.1 Transdutores

Nos ensaios triaxiais são normalmente usados transdutores de diversos tipos: LVDT's, células de carga, transdutores de pressão e medidores de volume. Além destes, existem outros menos comuns: transdutores de medição interna, de que os LDT (transdutores de deslocamento) são exemplo.

- LVDT (Linear Variable Differential Transformers):

Os LVDT's são transdutores para medição de deslocamentos lineares. Estes são constituídos por três bobinas e um núcleo cilíndrico de material ferromagnético, *Fig. 4*. A bobina central é chamada de primária e as outras de secundárias. O núcleo move-se solidariamente com o objecto cujo deslocamento se deseja medir, alterando o acoplamento magnético entre a bobina primária e as bobinas secundárias, causando assim uma alteração na tensão de saída (alternada). Usando um condicionamento de sinal apropriado, o sinal de saída é convertido em DC, directamente proporcional ao deslocamento do núcleo (dentro da sua gama de funcionamento).



*Fig. 4: Esquema de um LVDT*

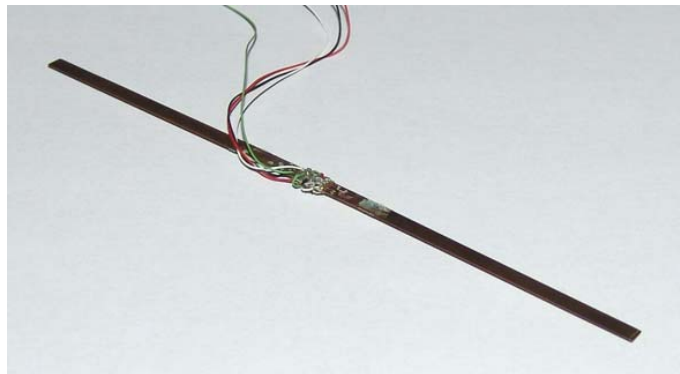
Estes transdutores são muito utilizados medir a deformação das amostras devido à sua elevada linearidade e exactidão, não estando sujeitos a desgaste mecânico, *Fig. 5*.



*Fig. 5: LVDT*

- LDT (Local Deformation Transducer)

Os LDT's (*Fig. 6*) são utilizados são, tal como os LVDT's, utilizados na medições de deslocamentos lineares. Estes são fixos à amostra, no interior da câmara, e a deformação é detectada por extensómetros fixos a uma tira metálica flexível.



*Fig. 6: LDT*

- Transdutor de deslocamento Potenciométrico:

Comparativamente com os LVDT's, estes transdutores têm como principais vantagens o seu reduzido tamanho e custo, contudo estão sujeitos a desgaste e têm uma menor exactidão, *Fig. 7*.

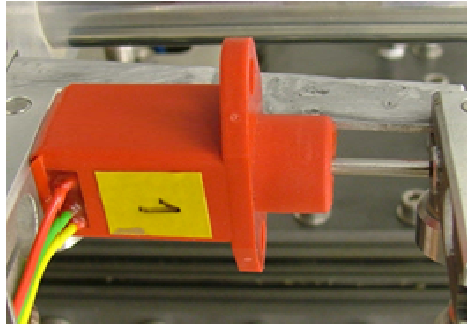


Fig. 7: Transdutor de Deslocamento Potenciométrico

- Medidor de Volume:

Os medidores de volume usados nos ensaios triaxiais são basicamente constituídos por um pequeno cilindro hidráulico cujo êmbolo está solidário com um LVDT. Assim, conhecido o diâmetro do cilindro e o deslocamento do êmbolo, determina-se facilmente o volume de água transferido, Fig. 8 e Fig. 9.

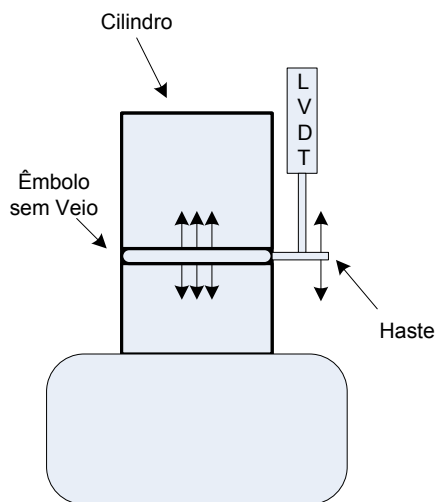


Fig. 8: Esquema do Medidor de Volume



Fig. 9: Medidor de Volume

- Células de carga:

Uma célula de carga (Fig. 10) é um transdutor de força constituído por um núcleo mecânico especialmente desenhado, sendo a sua deformação medida através de extensómetros de resistência eléctrica montados em ponte de Wheatstone ([http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte\\_de\\_Wheatstone](http://pt.wikipedia.org/wiki/Ponte_de_Wheatstone)). Normalmente uma célula de carga utiliza quatro extensómetros, contudo existem outras



configurações com apenas um ou dois extensómetros. A amplitude do sinal eléctrico de saída é bastante reduzida, normalmente da ordem dos poucos mV, requerendo em geral amplificação de sinal.

Nos ensaios triaxiais as células de carga medem a força axial aplicada na amostra.



Fig. 10: Célula de Carga

- Transdutores de pressão:

Os transdutores de pressão (*Fig. 11*) são tipicamente usados na medição da pressão de gases e líquidos. Estes transdutores têm em geral uma membrana que contacta com o fluído, estando assim sujeita a uma deformação proporcional à pressão aplicada. Na outra face são aplicados extensómetros que medem a deformação da membrana e assim determinam a pressão aplicada.

Neste tipo de ensaios, os transdutores de pressão são utilizados para medir as pressões em cada um dos eixos de controlo.



Fig. 11: Transdutor de Pressão

### 2.2.2 Módulos de Aquisição de Dados

Para a aquisição dos sinais dos transdutores é necessário um equipamento de aquisição de dados. Estes equipamentos são geralmente compostos por placas ou módulos de aquisição inseridos no barramento do PC, ou ligados exteriormente por porta série RS232, RS485, paralela, USB, Firewire ou GPIB-488. Na selecção do equipamento a usar, os aspectos mais importantes a considerar são: a resolução do conversor e a velocidade de aquisição, sendo que o seu custo aumenta exponencialmente com o aumento destes parâmetros.

Nos ensaios triaxiais realizados no LabGeo o sistema de aquisição utilizado é o *Datascan 7000 Series*, Fig. 12. Este dispositivo tem capacidade de aquisição de sinais analógicos/digitais e foi especialmente desenvolvido para aplicações industriais.



Fig. 12: Datascan 7021

Devido à sua estrutura modular, o *Datascan 7000 Series* possibilita a aquisição de sinais desde 8 até 1000 canais, distribuídos em módulos ligados em rede RS485. Cada módulo inclui um conversor A/D de 16 Bit de resolução, podendo o utilizador optar por uma resolução de 14 Bit aumentando a velocidade de conversão de 10 vezes. O *Datascan* permite a ligação de transdutores com saída em tensão ou em corrente, e está também preparado para a leitura de termopares, RTD, entre outros.

As gamas suportadas por este equipamento, e as respectivas resoluções, encontram-se na *Tabela 3*.

*Tabela 3: Gamas Suportadas pelo Datascan 7000 series [6][7]*

Tabela 3: Gamas Suportadas pelo Datascan 7000 series [6][7]

Gama	14 Bit	16 Bit
20 mA	1,2207 $\mu$ A	0,3052 $\mu$ A
150 mV	9,1553 $\mu$ V	2,2888 $\mu$ V
1,3 V	793 $\mu$ V	19,8 $\mu$ V
10 V	610,4 $\mu$ V	152,6 $\mu$ V

A comunicação com o módulo, isolada electricamente, faz-se via porta série RS232 ou 485 a velocidades até 38400 bit/s. No segundo caso pode-se ligar até 32 módulos ao longo de 1,2 km.

O modelo existente no LabGeo é o 7220 com 16 canais de entrada e uma taxa máxima de aquisição de 40Hz por canal a 16bit.

Nos ensaios triaxiais verdadeiros foi usada a carta de aquisição de dados da *National Instruments PCI-6221* (Fig. 13) uma vez que esta solução apresentava um preço mais reduzido. As gamas suportadas para esta carta, como a respectivas resoluções, são as apresentadas na **Erro! A origem da referência não foi encontrada..**

Tabela 4: Gamas Suportadas pela carta PCI-6221

Gama	Resolução
-10V a 10V	320 $\mu$ V
-5V a 5V	160 $\mu$ V
-1V a 1V	32 $\mu$ V
-200 mV a 200 mV	6,4 $\mu$ V

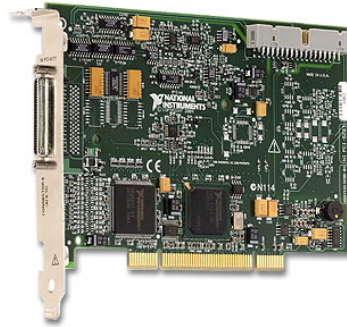


Fig. 13: Carta de Aquisição NI PCI-6221

### 2.2.3 Actuadores

A câmara triaxial (Fig. 2) ou o CUBO são sem dúvida os equipamentos mais importantes dos ensaios, já que é dentro deles que todo o ensaio se desenrola. As câmaras triaxiais são caracterizadas pelas suas dimensões, pressões máximas de operação e também pelo modo como a força axial pode ser aplicada. A escolha da câmara deve ter em conta o tipo de ensaio a realizar, assim como as dimensões da amostra.

Embora a água seja o meio transmissor da pressão entre o actuador e a amostra, utilizam-se diferentes tipos de actuadores comandados por sistemas pneumáticos ou motores eléctricos (em geral do tipo passo-a-passo).

O fabricante *GDS Instruments* ([www.gdsinstruments.com](http://www.gdsinstruments.com)) é um dos fabricantes especializados neste tipo de ensaios, com uma vasta oferta de actuadores com controlo de pressão incorporado.

Existem outros tipos de actuadores semelhantes aos da *GDS* mas que não estão equipados com controlo interno, tornando-se necessário o desenvolvimento de um controlador.

Uma outra forma de se controlar o sistema é recorrendo ao controlo da pressão de ar, utilizando um interface ar-água. Este sistema também existe no LabGeo apresentando bons resultados.

#### 2.2.3.1 Actuadores 'SAIC'

Este tipo de actuador é constituído por um êmbolo, um cilindro e um fuso comandado por um motor passo-a-passo (*MPP*). A rotação do fuso obriga o

êmbolo a movimentar-se linearmente dentro do cilindro 5 mm por volta completa, *Fig. 14*.



*Fig. 14: Actuador 'SAIC'*

O MPP usado têm as seguintes características [8]:

- modelo *PH299-03*, do fabricante *Vexta, Oriental Motor Co. Ltd*;
- duas fases alimentadas com 1A a 12V;
- resolução de  $1,8^\circ$  por passo, ou seja, para uma volta completa o motor tem de dar 400 meios passos ou 200 passos inteiros;
- Inclui um redutor de engrenagens com uma relação 10:1.

A Fig. 15 representa um esquema dos actuadores SAIC utilizados no desenvolvimento deste trabalho. O seu diâmetro é de 96mm e o curso é de 145 mm (para o modelo menor) e 460 mm (para o modelo maior), o comprimento do actuador é de 350 mm no primeiro caso e 964 mm no segundo. Acoplado mecanicamente ao fuso encontra-se um MPP, que por cada impulso gera uma rotação de  $0,9^\circ$  (caso esteja seleccionada a opção de meio-passo no drive do MPP), fazendo pressurizar a água.

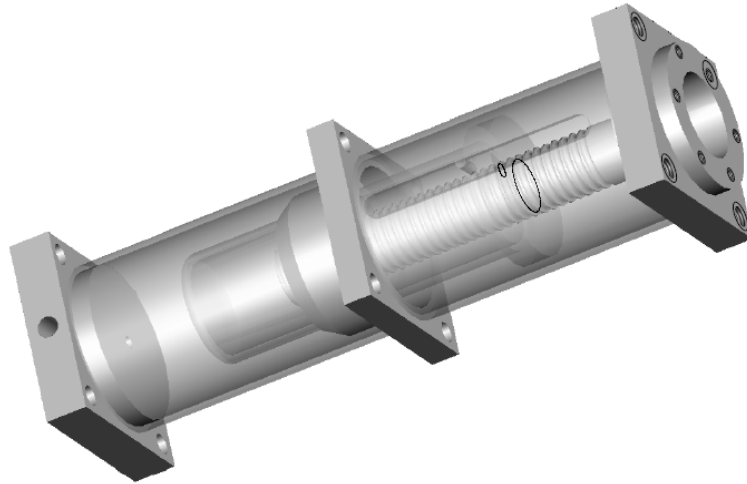


Fig. 15: Desenho em 3D do Actuador 'SAIC'

#### 2.2.3.2 Actuadores 'IC'

Ao contrário dos actuadores anteriores, estes são comandados pneumáticamente recorrendo a um sistema mecânico constituído por um *MPP* e um regulador de pressão de ar. Para isso é utilizado um dispositivo de interface ar-água, que através da compressão/extensão de uma membrana de borracha faz com que a pressão de ar seja aproximadamente igual à da água.

Um impulso do MPP permite uma variação de  $0,07\text{kPa}$  na saída do regulador. A pressão máxima suportada por estes actuadores situa-se nos  $800\text{kPa}$  (correspondente ao limite do regulador de pressão de ar).

#### 2.2.3.3 Actuadores 'GDS'

O equipamento da *GDS (STDDPC)* [9] é um controlador de pressão e volume, através de água ou óleo, Fig. 16. Foi concebido para uso comercial e para aprendizagem em laboratórios de mecânica dos solos. É constituído por um MPP e um fuso que actua sobre um pistão, pressurizando directamente a água. O controlo é efectuado em malha fechada e permite obter variações de  $1\text{ mm}^3$  por cada passo do motor.



Fig. 16: Controlador de Pressão STDDPC da GDS [9]

O STDDPC, consegue operar até  $1\text{MPa}/200\text{cm}^3$ , dispõe de uma interface série, sendo possível o comando a partir de um computador. Quando são utilizados mais do que um controlador no mesmo sistema, existe um dispositivo que permite ligar até quatro utilizando um repartidor de porta série. Este dispositivo tem um funcionamento semelhante a um multiplexer que redirecciona as comunicações do PC para os actuadores correspondente controlado pelos sinais de CTS e RTS usados no protocolo RS232.

Este actuador pode funcionar de autonomamente permitindo o envio ordens de referência, em rampa e ciclo, tanto de pressão como de volume através do seu painel de controlo.

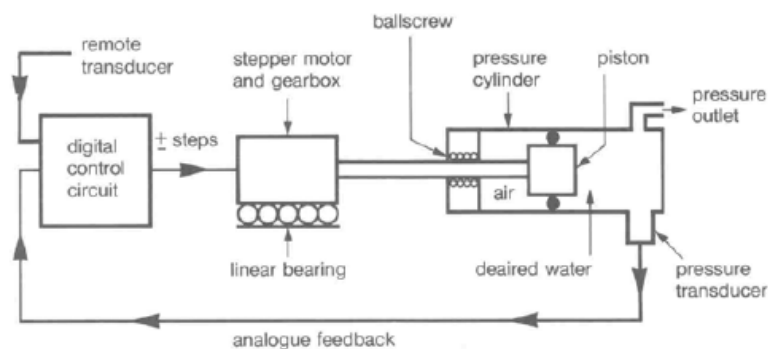


Fig. 17: Diagrama de Controlo GDS [9]

De seguida são apresentadas algumas das características técnicas deste controlador:

- gamas de pressões: 1, 2, 3, 4 MPa;
- capacidade Volumétrica:  $200\text{ cm}^3$  para todas as gamas de pressões;

- resolução: Pressão 1 kPa, volume 1 cm<sup>3</sup>;
- velocidade máxima operacional: 500mm<sup>3</sup>/segundo (Velocidade de esvaziamento).

#### 2.2.3.4 Prensa WFI Farrence

A prensa WF10056 TRITECH 50 (14), do fabricante Wykeham Farrance, foi desenvolvida para ensaios triaxiais de solos. Este equipamento permite ensaios de compressão e de corte numa grande gama de materiais, com uma carga máxima de 50kN. A velocidade máxima é de 10 mm/min e pode ser alterada durante o ensaio através do painel ou via porta série. Os limites do movimento estão protegidos em ambas direcções por fins de curso e estão equipados com sinais sonoros de aviso, Fig. 18.



Fig. 18: WFI TriTech 50 kN

As características da prensa são apresentadas de seguida:

- dimensões:
  - altura: 1460 mm,
  - largura: 503 mm,



- comprimento: 380 mm;
- largura interna horizontal: 384 mm;
- altura interna vertical (max): 1000 mm
- altura interna vertical (min): 335 mm;
- diâmetro da base de suporte: 158 mm;
- curso da base de suporte: 100 mm;
- velocidade: 0,00001 a 10 mm/min;
- peso: 98 kgf.

#### 2.2.3.5 Prensa da ELE

A prensa *Digital Tritest 100* da *ELE International* (13) foi concebida para a mesma função que a anterior, contudo suporta forças até 100kN. As principais características são apresentadas de seguida, *Fig. 19*.



*Fig. 19: ELE 100 kN*

- dimensões:
  - altura: 2400 mm,
  - largura: 630 mm,
  - comprimento: 570 mm;
- largura interna horizontal: 450 mm;
- altura interna vertical (max): 1060 mm;
- altura interna vertical (min): 330 mm;
- curso da base de suporte: 100 mm;
- velocidade: 0,00001 a 10 mm/min;
- peso: 255 kgf.

#### *2.2.3.6 Actuador Pneumático*

Nos ensaios triaxiais clássicos este tipo de actuador (*Fig. 20*) é utilizado quando se pretende exercer uma força axial controlada no provete. A força exercida por este actuador é aplicada na haste superior solidária com a célula de carga, como pode ser visto na *Fig. 2*.



*Fig. 20: Actuador Pneumático Adquirido*

Este actuador pneumático foi adquirido ao fabricante *ASCO Joucomatic* ([www.ascojoucomatic.com](http://www.ascojoucomatic.com)) no decorrer do trabalho para um melhor comportamento do sistema e após um levantamento das características dos actuadores do mercado. Este actuador foi escolhido tendo em conta o seu baixo atrito e vedantes indicados para funcionar com óleo (Referência: *PES125TA100R-DMP/OLEO*).

#### **2.2.4 Software**

O último aspecto deste trabalho relaciona-se com a selecção da plataforma de desenvolvimento de software para esta aplicação.

Actualmente existem várias soluções “chave na mão” para a realização de ensaios triaxiais, contudo têm um custo elevado e são em geral pouco flexíveis não permitindo a ligação a equipamentos de outros fabricantes.

##### **2.2.4.1 TRIAX**

Uma solução usada por alguns laboratórios é o *TRIAX*, desenvolvido pelo Dr. David G. Tool da Universidade de Durham. Este software, já na quinta versão, possibilita o uso de oito tipos de actuadores diferentes, contudo nos ensaios realizados no LabGeo surgiram vários problemas na sua utilização. Um desses problemas foi a variação do intervalo de aquisição, fazendo com que a posterior análise do ensaio seja prejudicada. Um outro problema foi o envio de ordens erradas para uma prensa induzindo velocidade mais rápidas do que as permitidas para o ensaio. Assim, no LabGeo usa-se preferencialmente uma versão mais antiga do *TRIAX* com actuadores 'IC'.

##### **2.2.4.2 Desenvolvimento de novas aplicações**

As linguagens de programação disponíveis no mercado para o desenvolvimento de aplicações são vastas, entre elas encontram-se as seguintes: *Visual Basic*, *C++*, *Java*, *Delphi* e o *LabVIEW*.

Uma característica importante na escolha da linguagem de programação é a facilidade de alteração de aspectos visuais e de introdução de modificações no código por parte dos futuros utilizadores. Sendo o *LabVIEW* já usado no LabGeo noutros ensaios, optou-se por esta solução para manter a ferramenta

de desenvolvimento.

De uma forma simples o *LabVIEW*, criado pela *National Instruments* ([www.ni.com](http://www.ni.com)), é uma ferramenta de software concebida para testes, medições e controlo de sistemas laboratoriais. Ao longo do tempo as suas capacidades foram expandidas, assim como melhorado o seu aspecto gráfico, sendo hoje uma ferramenta usada nos laboratórios em todo o mundo.

O *LabVIEW* tem ainda a vantagem de permitir uma ligação fácil com as placas de aquisição de dados, especialmente as do mesmo fabricante. A flexibilidade da linguagem de programação combinada com as funções disponíveis, especialmente desenvolvidas, permite a criação de aplicações muito simples até ao controlo de sistemas complexos de tempo real.

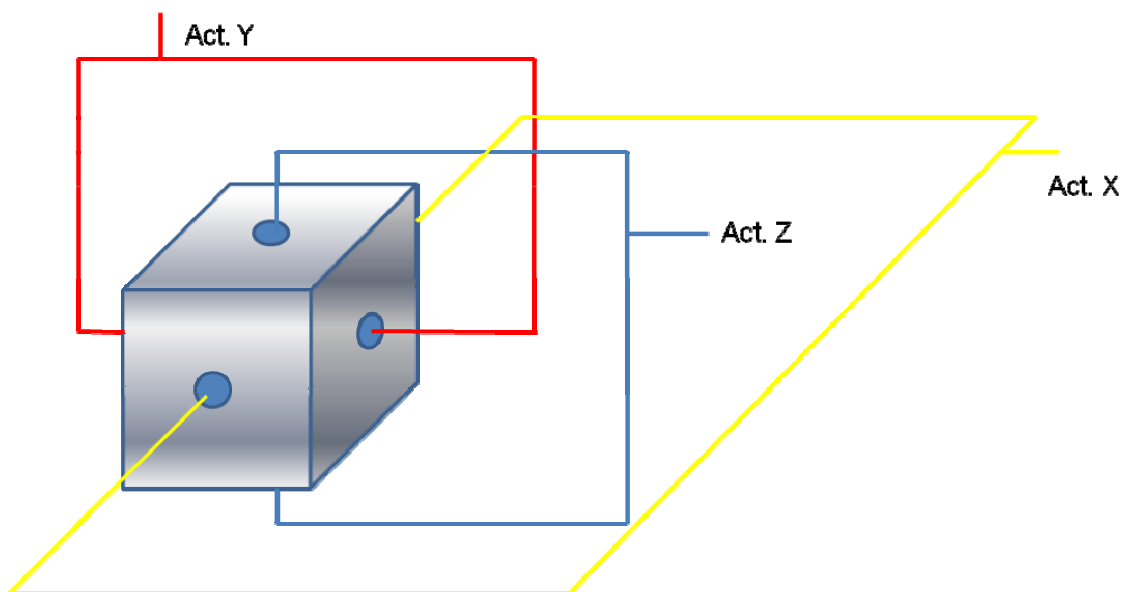
### 3 Monitorização e Controlo do Ensaio Triaxial Verdadeiro

#### 3.1 Introdução

O LabGeo tem vindo a dedicar uma atenção particular aos ensaios triaxiais verdadeiros que, embora menos comuns e menos estudados, permitem um melhor conhecimento das características reais dos solos. Este tipo de ensaio é muito recente e são poucos os laboratórios de geotecnia a nível mundial que têm uma plataforma para a sua realização.

Nos ensaios triaxiais verdadeiros existe a possibilidade de aplicar tensões independentes nas três direcções ortogonais, o que representa um avanço significativo em relação aos ensaios clássicos, uma vez que permitem simular melhor em laboratório o comportamento do solo em ambiente real.

Nos ensaios triaxiais a câmara de ensaio é apelidada de *CUBO*, devido à sua forma, conforme foi apresentado na *Fig. 3* e se pode também visualizar no esquema da *Fig. 21*. Idealmente nestes ensaios cada face do *CUBO* deveria ser comandada separadamente, o que daria um total de seis actuadores. No sentido de minimizar o investimento, o LabGeo adquiriu apenas três actuadores que actuam simultaneamente em duas faces opostas.



*Fig. 21: Esquema das Ligações Hidráulicas do CUBO*

A aplicação de monitorização e controlo desenvolvida para os ensaios triaxiais verdadeiros deve controlar a pressão em cada actuador e monitorizar o sistema, adquirindo as informações de pressão, volume e deformação.

### **3.2 Solução de Controlo**

Num ensaio triaxial verdadeiro o movimento dos três eixos ortogonais deve ser controlado independentemente segundo trajectórias distintas. Neste sistema foram utilizados actuadores do fabricante *GDS*, que permitem o controlo da pressão e do volume através da água.

A aplicação desenvolvida envia o valor desejado para cada actuador, sendo o controlo de pressão e de volume efectuado por uma unidade electrónica. Para os casos em que o ensaio triaxial verdadeiro necessita de um controlo por deformação, desenvolveu-se um algoritmo que permite controlar o respectivo eixo através das leituras obtidas dos transdutores de deslocamento acoplados às faces do *CUBO*. Mais à frente, este tipo de controlo será analisado com mais detalhe.

#### **3.2.1 Hardware Utilizado**

Nos ensaios triaxiais verdadeiros, o equipamento mais importante é a câmara triaxial, o *CUBO*, já que é dentro deste que todo o ensaio decorre.

O *CUBO* é constituído por 6 faces iguais e uma estrutura metálica onde essas faces são fixadas. Cada face é constituída por duas placas metálicas paralelas separadas por uma membrana de borracha. Por acção da água sob pressão entre a membrana e a placa exterior, a placa interior (móvel) é empurrada, pressionando assim a amostra. Desta forma, cada face do *CUBO* funciona como um êmbolo quadrado com uma grande superfície e um curso máximo de 10 mm.

Para medir a deformação das faces do cubo é utilizado um transdutor de deslocamento potenciométrico (*Fig. 7*) solidário com a estrutura do *CUBO*. Para validar as características dos transdutores, estes foram testados conforme mostrado na *Fig. 22*.

Para a aquisição dos sinais dos transdutores foi utilizada a placa NI-PCI

6221 (<http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/14132>) da *National Instruments*, e o respectivo terminal de ligações. Os sinais dos transdutores de deslocamento foram ligados em modo diferencial, ocupando 6 das 8 entradas da placa de aquisição de dados. Para permitir a minimização do efeito de possíveis variações na alimentação dos transdutores foi utilizada outra entrada para a sua leitura.

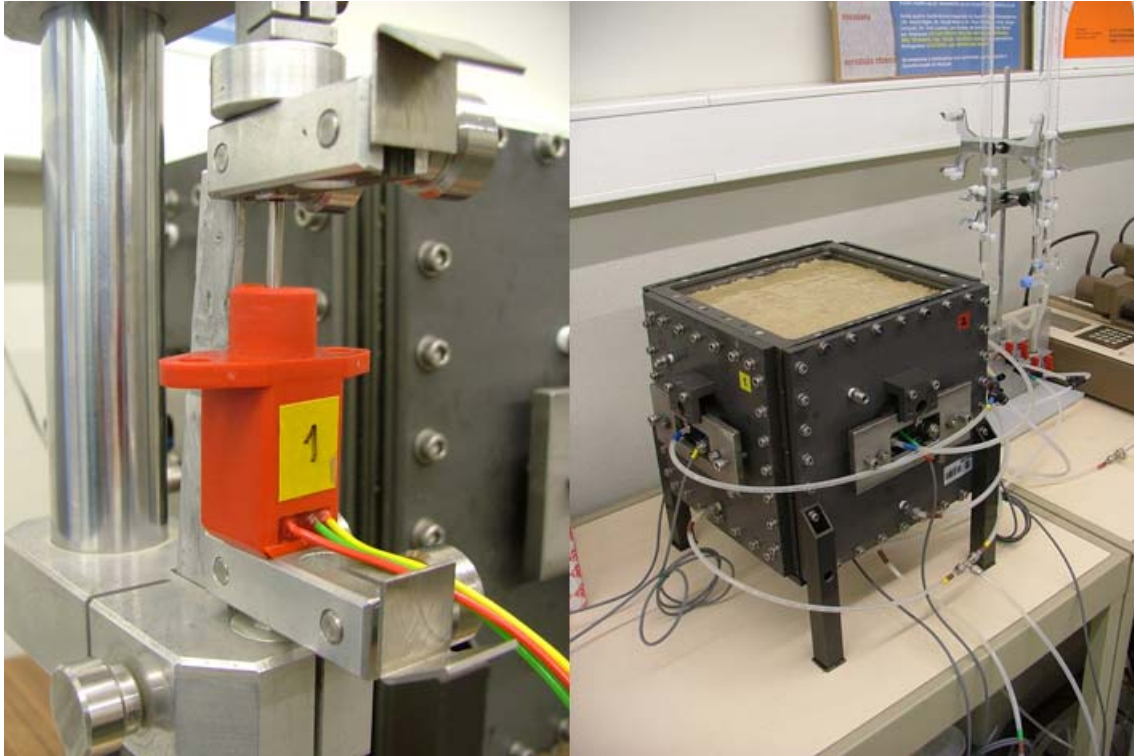


Fig. 22: Transdutor de deformação e cubo triaxial

De acordo com o fabricante (8), a saída dos transdutores é proporcional ao deslocamento, podendo ser representado pela equação (3-1).

$$\text{deslocamento} = V_{\text{Transdutor}} \times K + V_{\text{Zero}} \quad (3-1)$$

O valor de  $K$  obtido nos testes foi de 12,5.

Durante o ensaio triaxial verdadeiro o controlo de pressão, como foi dito anteriormente, baseia-se num envio do valor desejado para os actuadores da GDS, já que estes têm controlo interno de pressão e volume. Para os casos em que o ensaio requer um controlo em deformação desenvolveu-se um algoritmo

baseado num controlador proporcional. A deformação do solo corresponde ao deslocamento das placas interiores do *CUBO*, sendo este proporcional à quantidade de água injectada. A equação (3-2) é a usada pela aplicação para o controlo de deformação nos três eixos, considerando-se a média entre as duas deformações do respectivo eixo.

$$\Delta V = \left( Deformação_{Desejada} - \frac{(Def_{Atrás Pres.} + Def_{Frente Pres.})}{2} \right) \cdot K \quad (3-2)$$

O valor de *K* que gerou melhores resultados foi de 5000, não sendo o sistema sensível a pequenas alterações deste valor.

### **3.3 Aplicação Desenvolvida**

A aplicação para controlo de ensaios triaxiais verdadeiros foi escrita em *LabVIEW*, e está dividida em quatro partes funcionais para facilitar e organizar o seu desenvolvimento, que serão apresentadas em seguida:

- **Teste e configuração dos actuadores GDS**

O teste e configuração dos actuadores são apresentados no separador ‘*GDS*’. Nesse separador, o utilizador pode obter informações de cada um dos actuadores ligados ao sistema e configurar as comunicações com o *PC*. Para o correcto funcionamento da aplicação, os terminais de comunicação série dos actuadores e do *PC* devem ter os parâmetros associados iguais, como é o caso da velocidade, paridade e número de *stop Bit's*.

No sub-separador ‘*Test*’ (*Fig. 23*), do separador ‘*GDS*’, o utilizador pode enviar ordens para cada actuador em pressão ou em volume, permitindo analisar se os actuadores se encontram prontos para funcionar.



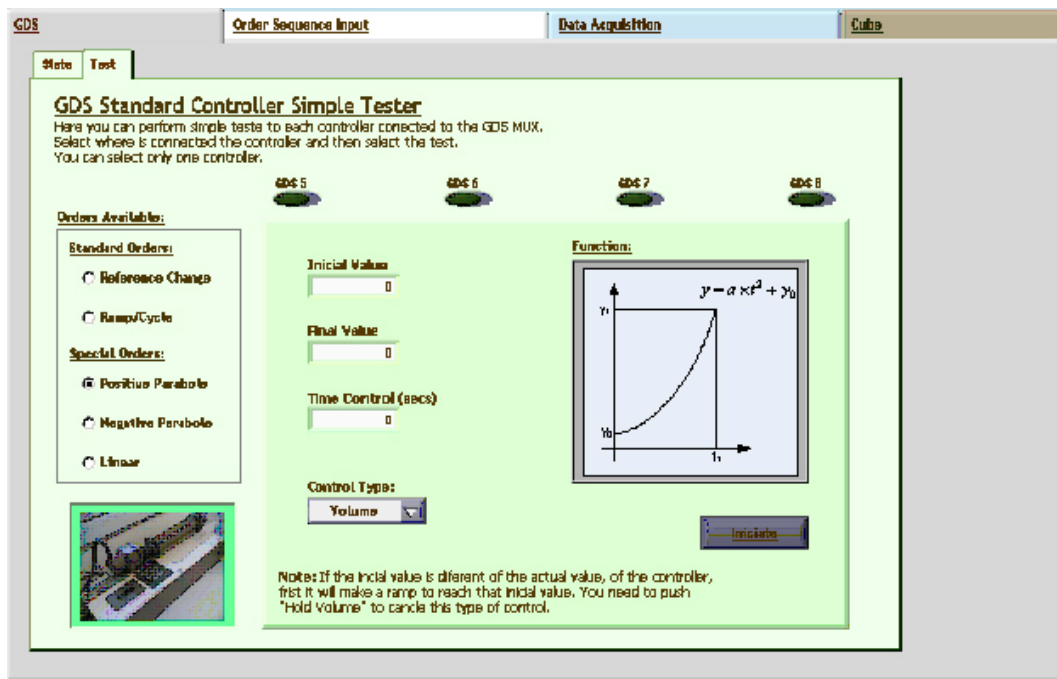


Fig. 23: Separador GDS

Através do sub-separador 'State' pode-se saber para cada actuador se:

- a pressão e o volume lidos têm valor negativo;
- o limite de pressão foi excedido;
- o limite de volume foi atingido;
- a função 'Hold Volume' está ligada;
- o actuador está sob controlo do computador.

As funções presentes no sub-separador 'Test' permitem ao utilizador enviar dois tipos de ordens que são apresentadas de seguida:

- 'Standard Orders':
  - 'Reference Change': permite definir a referência de controlo do volume ou da pressão de um actuador;
  - 'Ramp/Cycle': envia para o controlador uma ordem para ir de um valor para outro linearmente, num dado intervalo de tempo. Se o utilizador desejar, o actuador poderá fazer ciclos entre esses dois valores durante o intervalo de tempo definido.

- *'Special Orders'*:
  - *'Positive Parabole'*: envia valores de referência de pressão ou volume seguindo um perfil parabólico com concavidade positiva;
  - *'Negative Parabole'*: semelhante ao anterior, contudo com concavidade negativa.

- ***Definição das ordens de controlo para cada eixo do cubo***

Na realização dos ensaios triaxiais verdadeiros é necessário enviar uma *receita* com a evolução da pressão pretendida para cada um dos eixos. Estes comandos são tradicionalmente introduzidos manualmente, funcionando cada actuador independentemente dos outros, não sendo por isso uma solução apropriada. Quanto se envia uma ordem de aumento da pressão num dado eixo, em que é preciso enviar água para o *CUBO*, e o actuador correspondente atinja o fim do seu curso, a pressão naturalmente deixará de aumentar. Nos casos em que são comandados os três actuadores em simultâneo e um deles atinge o fim de curso não havia nenhum mecanismo para parar os outros dois actuadores, a fim de não danificar a amostra.

Com a aplicação desenvolvida, os ensaios triaxiais verdadeiros começaram a ser realizados com os três eixos a funcionar coordenadamente, fazendo com o que o sistema se torne mais fiável e autónomo. Desta forma o aumento de pressões dos três actuadores é progressivo e se um dos eixos necessitar de mais tempo para atingir um dado valor os outros dois actuadores acompanham esse desenvolvimento solidariamente.

Os comandos para os ensaios triaxiais verdadeiros encontram-se no separador *'Order Sequence Input'*, onde podem ser elaboradas sequências de ordens de comando para os três actuadores do *CUBO*. Para isso, existem três situações diferentes: *'Present Order'*, *'Next Order'* e *'New Order'*, ver *Fig. 24*.

Para inserir uma nova ordem, deve-se preencher os campos *'New Order'*, para cada eixo (X, Y, e Z) constituídos por: *'Final Value'*, *'Initial Value'* e *'Control Type'*. O campo *'Control Type'* permite escolher o tipo de controlo a aplicar e pode ser:

- 'Linear': Evolução linear entre 'Initial Value' e 'Final Value', da pressão ou do volume;
- 'Hold': Mantém o valor 'Final Value', de pressão ou do volume;
- 'Deformation': Evolução linear entre 'Initial Value' e 'Final Value' do deslocamento;
- "No Control": Não envia ordens para o actuador.

O tempo desejado para cada ordem é apresentado do lado direito de cada 'Order', Fig. 24.

Fig. 24: Separador para inserir novas ordens

Na secção 'Next Order' podem ser vistas as ordens já inseridas e, caso seja necessário, editar algum desses campos. Do lado direito do separador existem três botões e dois indicadores numéricos que permitem visualizar todas as ordens já inseridas e saber qual a sua ordem de execução.

A secção 'Present Order' contém a ordem que se encontra em execução sendo ainda possível editar os seus campos. Do lado direito do separador 'Order Sequence Input' existem três botões: 'Start Control', 'Go To Next Order' e 'Terminate'. Através destes botões o utilizador pode (des)ligar o controlo do

ensaio. Quando o ensaio está a decorrer o botão *Start Control* fica com a cor verde.

- **Aquisição de dados dos actuadores da GDS**

Para o utilizador poder ver as informações dos actuadores durante o ensaio, as leituras de pressão e volume efectuadas podem ser visualizadas no separador *'Data Acquisition'* como apresentado na Fig. 25. Neste separador existe um gráfico para as leituras de pressão e outro para as leituras de volume dos actuadores e também oito indicadores numéricos com os valores de pressão e volume de cada actuador.



Fig. 25: Apresentação dos valores de pressão e volume dos actuadores GDS

A aplicação permite ainda guardar os dados do ensaio para um ficheiro definido na parte inferior do separador *'Data Acquisition'*, Fig. 25. Do lado esquerdo encontram-se os botões de selecção dos actuadores *'GDS X'* e do lado direito o campo *'Sample Time(sec)'* permite definir o intervalo de aquisição para o ficheiro cujo endereço é introduzido no campo *'Save as...'*. Para se iniciar a aquisição deve-se pressionar o botão *'Start'*.

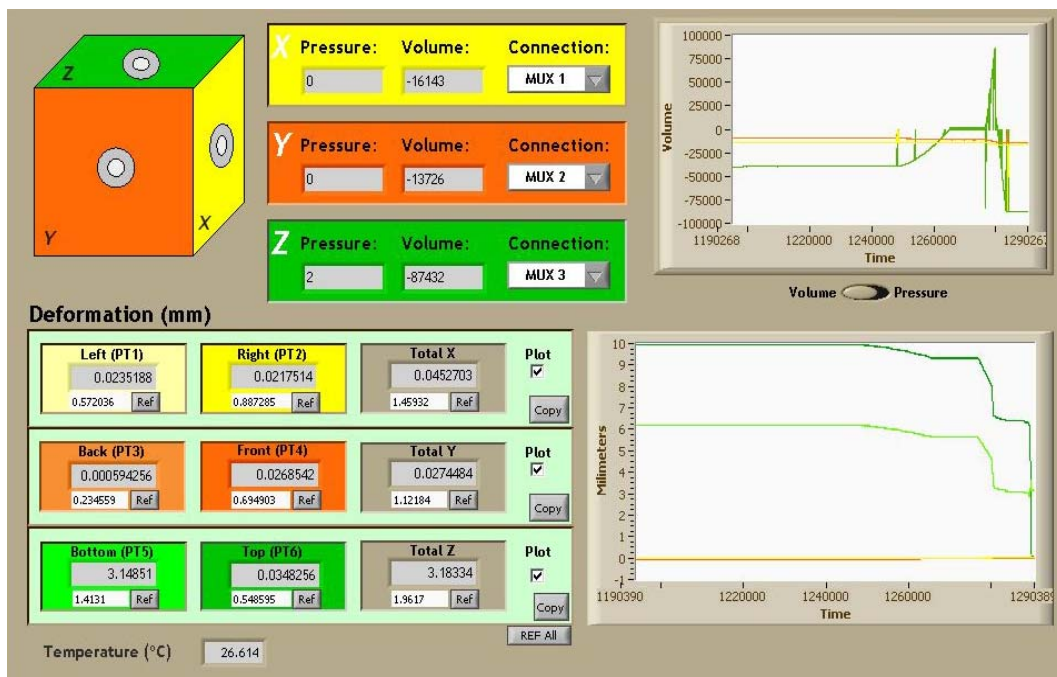
Os valores dos actuadores no separador *'Data Acquisition'* são actualizados

independentemente do ensaio, ou seja, não é necessário que o ensaio esteja a decorrer.

- **Visualização dos valores associados ao CUBO**

O separador ‘Cube’ apresenta as pressões e volumes dos actuadores de cada eixo X, Y e Z, *Fig. 26*. Além disso, cada eixo contém uma *listbox* cujo valor corresponde ao terminal onde o actuador é ligado ao *Multiplexer* da *GDS*.

No lado superior direito do separador ‘Cube’ é apresentado um gráfico com o traçado da pressão ou volume (consoante a posição do botão existente em baixo desse gráfico) de cada eixo do *CUBO*. Na parte inferior do separador estão os valores adquiridos continuamente dos transdutores de deslocamento e também um gráfico onde se representa a evolução das deformações ao longo do ensaio triaxial verdadeiro.



*Fig. 26: Aplicação do Ensaio Triaxial Verdadeiro*

### **3.4 Programação em LabVIEW**

Para o utilizador compreender mais facilmente o código desenvolvido, a explicação deste foi dividida segundo as suas funcionalidades. Uma total compreensão do programa será mais fácil se o utilizador compreender os requisitos gerais de um ensaio triaxial e observar o código implementado.

#### **3.4.1 Inicialização de variáveis**

Na parte superior do diagrama de blocos estão presentes as inicializações do programa. Para o correcto funcionamento do programa os valores iniciais das variáveis devem ser atentamente atribuídos.

#### **3.4.2 Envio de Ordens**

A aplicação pode enviar para os actuadores ordens simples (ex. mudar valor de pressão de um actuador) até a ordens mais complexas. Estas ordens mais complexas envolvem os três actuadores em simultâneo funcionando de um modo solidário o que torna possível a correcta realização dos ensaios triaxiais verdadeiros.

##### **3.4.2.1 Ordens Simples**

As ordens simples podem ser enviadas para cada actuador através do separador 'GDS' (*Fig. 23*) e consistem no envio de rampas ou mudanças de referência, tanto em volume como em pressão, sem qualquer espécie de controlo em malha fechada. Do lado esquerdo da *Fig. 27* é feita a selecção das ordens e do lado direito as funções a executar, representadas pelos quatro blocos mais pequenos, com os nomes de *R.C.* (Mudança de Referência) e *R&C* (*Rampas e Ciclos*).

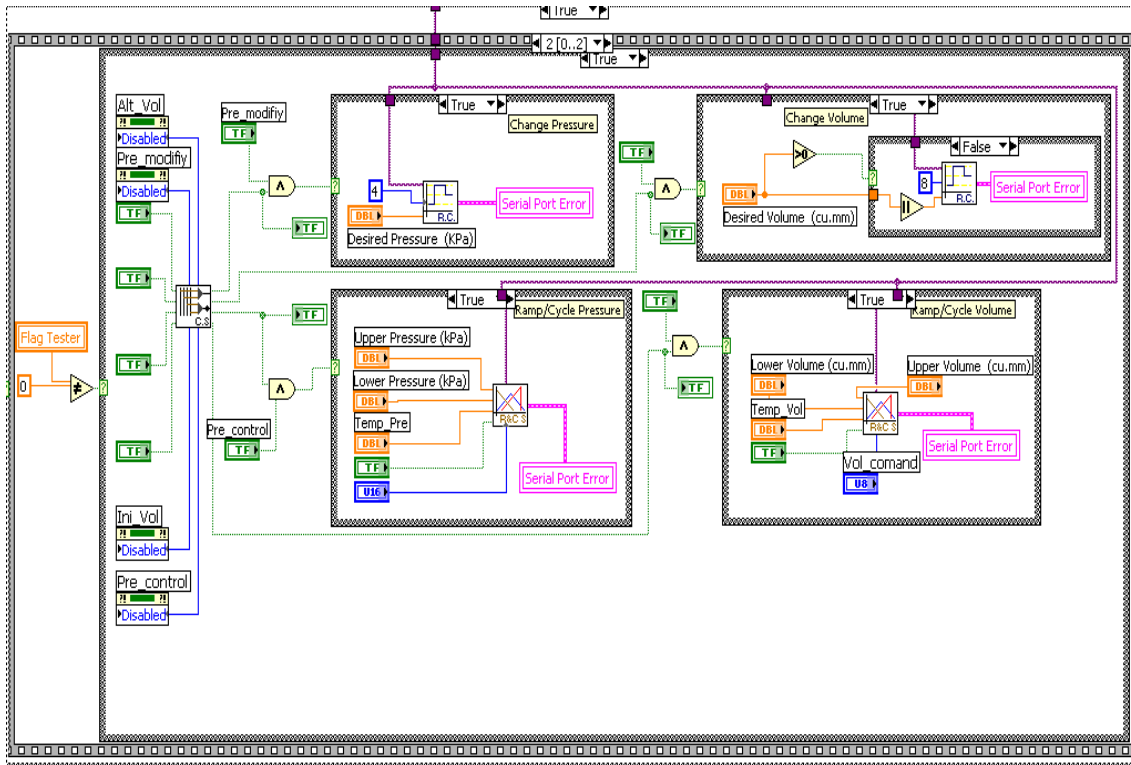


Fig. 27: Envio de Ordens Simples

#### 3.4.2.2 Ordens Usadas Durante os Ensaio

Para a realização de ensaios triaxiais verdadeiros, têm de ser elaboradas ordens para cada um dos eixos de controlo e inseridas no separador 'Cube' (ver Fig. 24). Essas ordens permitem que a aplicação controle o ensaio fazendo com que cada actuador não funcione por si só, mas sim como pertencente a um sistema em que o seu estado está dependente dos outros actuadores do sistema. O funcionamento geral da aplicação é apresentado no fluxograma da Fig. 28.

Na sequência do comando de início de ensaio por parte do utilizador, a primeira ordem inserida é carregada para a memória e começam a ser enviados os valores desejado para os actuadores ligados ao CUBO.

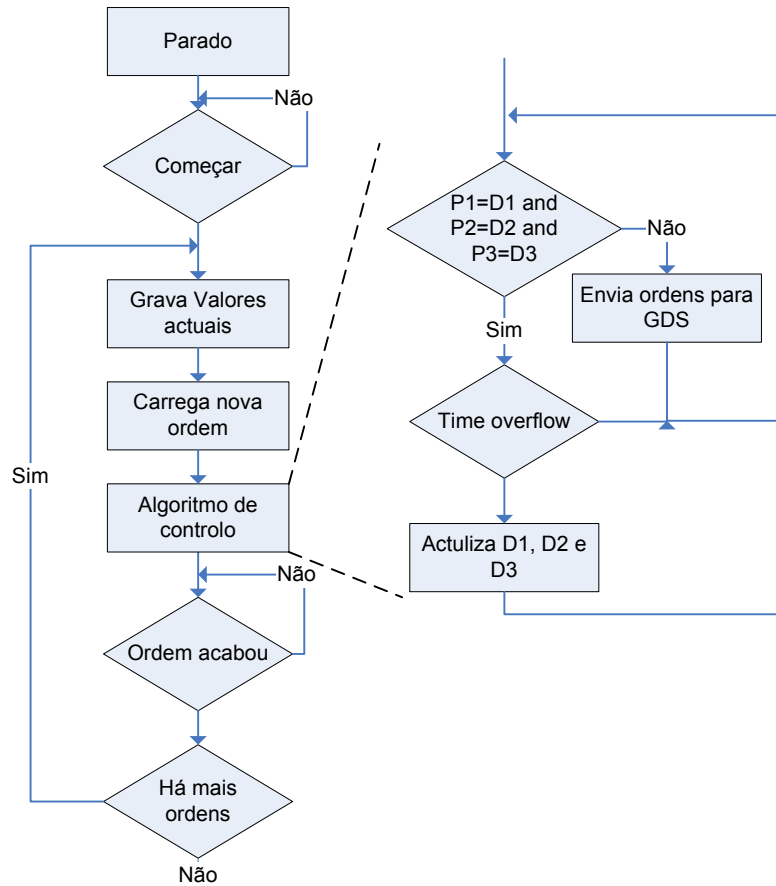


Fig. 28: Algoritmo de Controlo Simplificado

Quando se pretende uma mudança de referência de controlo dos actuadores a aplicação envia esse novo valor; nos casos em que há uma evolução linear, a aplicação analisa a evolução real dos actuadores coordenando as ordens de modo a que as posições finais sejam atingidas ao mesmo tempo. Tome-se como exemplo o seguinte caso: se o valor final a atingir for  $10kPa$  e o inicial  $5kPa$  num período de tempo  $t$  a sua evolução terá um declive de  $5/t$ , com uma taxa de actualização dos valores desejados de  $1,5$  segundos, que corresponde à taxa de aquisição de dados do programa. Desta forma teríamos  $t/1,5$  instantes de actualização ( $n$ ).

Assim, o valor desejado será sempre igual a

$$V_{Desejado} = \Delta P \cdot \frac{T}{t} + V_{Inicial} \quad (3-3)$$



em que:

$$T = n \cdot \frac{t}{1,5} \quad (3-4)$$

ou seja,

$$V_{Desejado} = \Delta P \cdot \frac{1}{1,5} \cdot n + V_{Inicial} \quad (3-5)$$

Sempre que o valor desejado tiver sido atingido, então a aplicação actualiza-os para os novos valores de acordo com a expressão. Este método de controlo obriga a uma evolução linear com uma duração igual ou superior ao tempo inserido na própria ordem. O tempo máximo dependerá da amostra, já que nestes ensaios é impossível prever qual será a resposta dos três eixos num solo com características de deformabilidade desconhecidas e um tempo de estabilização (deformações) incerto.

O programa em *LabVIEW* para o controlo das ordens é apresentado no esquema da Fig. 29.

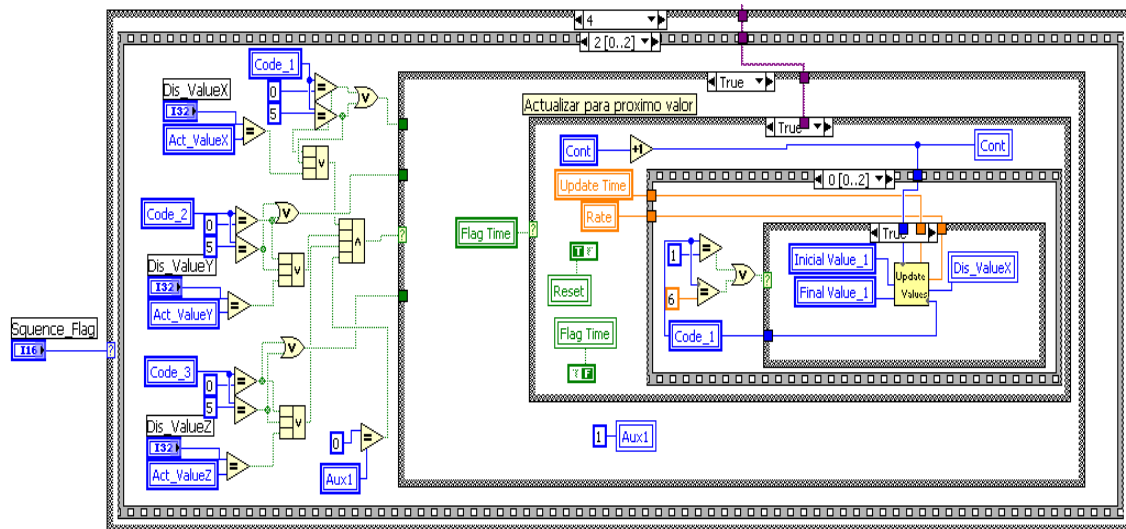


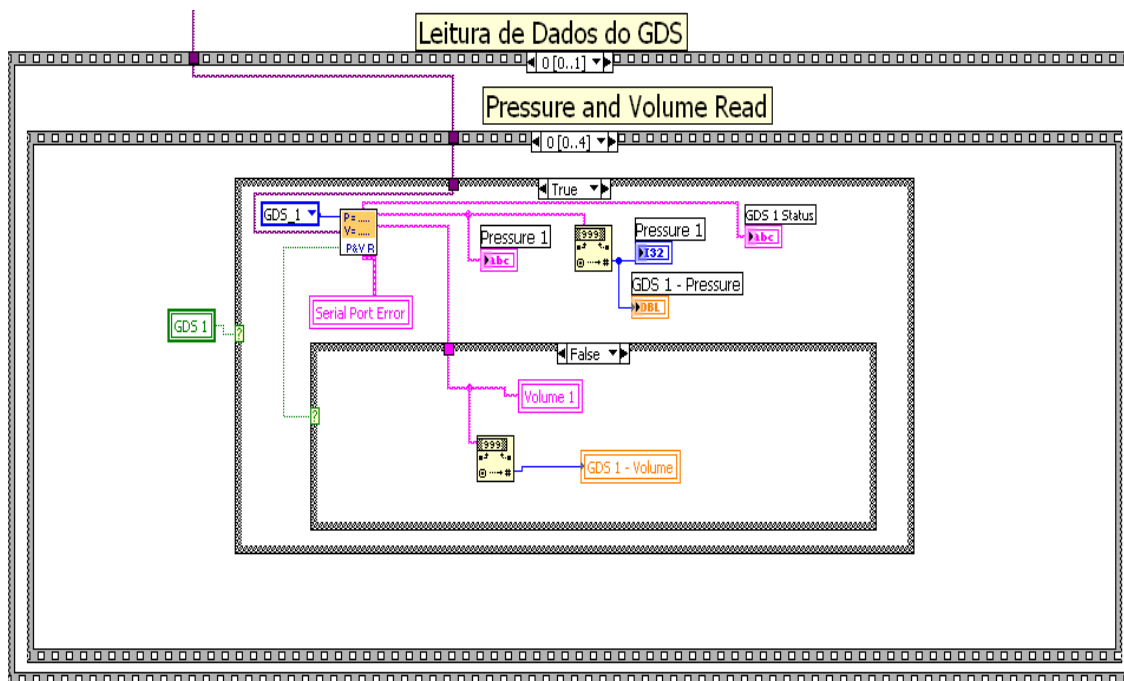
Fig. 29: Código de Controlo do Ensaio

### 3.4.3 Leitura e Visualização de Dados

Para a posterior análise do ensaio devem ser registados os seguintes dados: pressão e volume de cada actuador e a deformação de cada uma das seis faces do *CUBO*.

As informações de cada actuador ligado ao sistema são adquiridas via porta série através de um pedido de leitura enviado pelo *PC*. Na *Fig. 30* está representada a leitura dos dados do actuador ligado à primeira saída do *multiplexer* da *GDS* e contém a função com o código de leitura das pressões e volumes do actuador.

Se os valores das pressões ou volumes forem negativos, o programa envia uma mensagem de aviso para o utilizador.



*Fig. 30: Leitura de Pressão e Volume*

Na *Fig. 31* está representada outra das mensagens trocadas entre o *PC* e o equipamento da *GDS*, onde são adquiridas informações dos actuadores e apresentadas no sub-separador 'State' do separador *GDS* (ver *Fig. 23*).

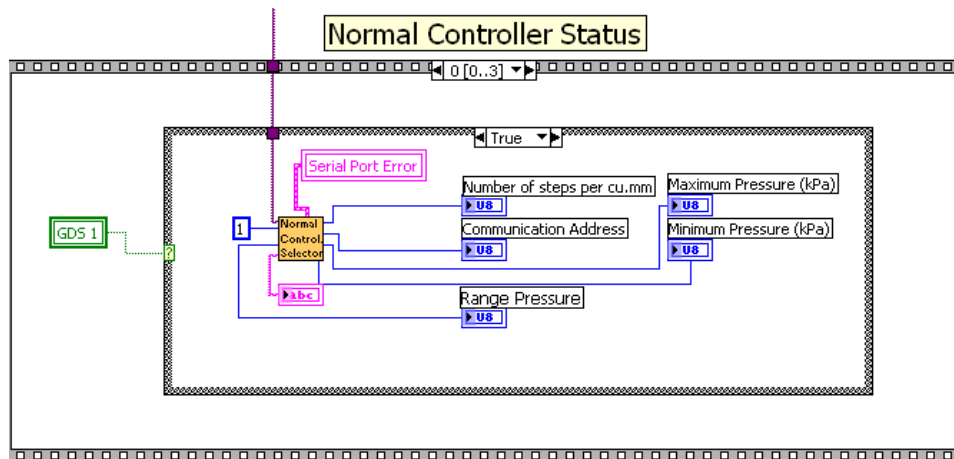


Fig. 31: Leitura de Dados Internos

Na Fig. 32 está representado o código desenvolvido para a leitura das deformações. A função '*Deform Aquis.*', adquire e converte os valores de tensão em deformação, agrupando-os num vector.

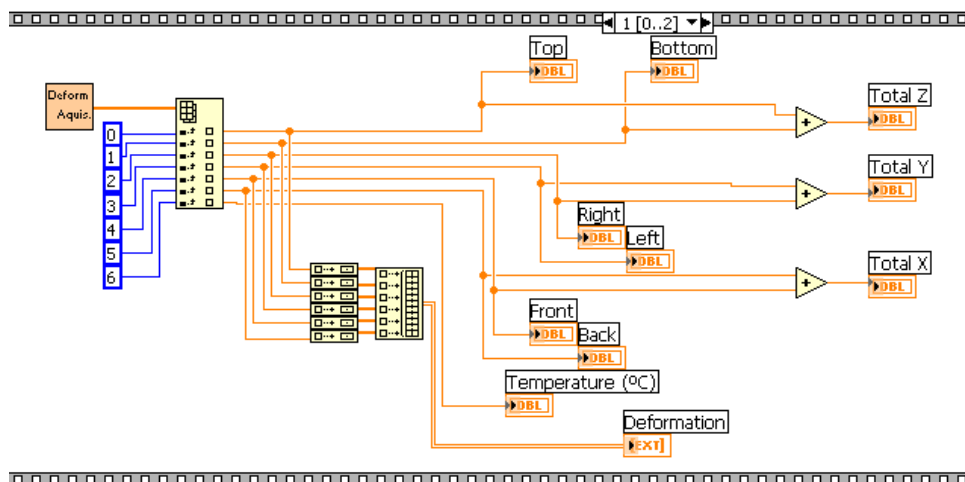


Fig. 32: Leitura das Deformações

### 3.5 Resultados Obtidos

Os ensaios reais permitiram não só validar o sistema, como também receber o *feedback* dos utilizadores finais permitindo a implementação de funções adicionais.

Os ensaios triaxiais verdadeiros realizados no LabGeo baseiam-se principalmente em dois tipos:

- Os mais simples consistem na aplicação pressões previamente definidas, sendo recebida a deformação resultante nas faces do *CUBO* (Fig. 33 e Fig. 34);
- Os outros consistem em impor uma deformação constante nos eixos horizontais e uma pressão variável no eixo vertical, sendo adquirida a pressão induzida pelo solo horizontais do *CUBO* (Fig. 35).

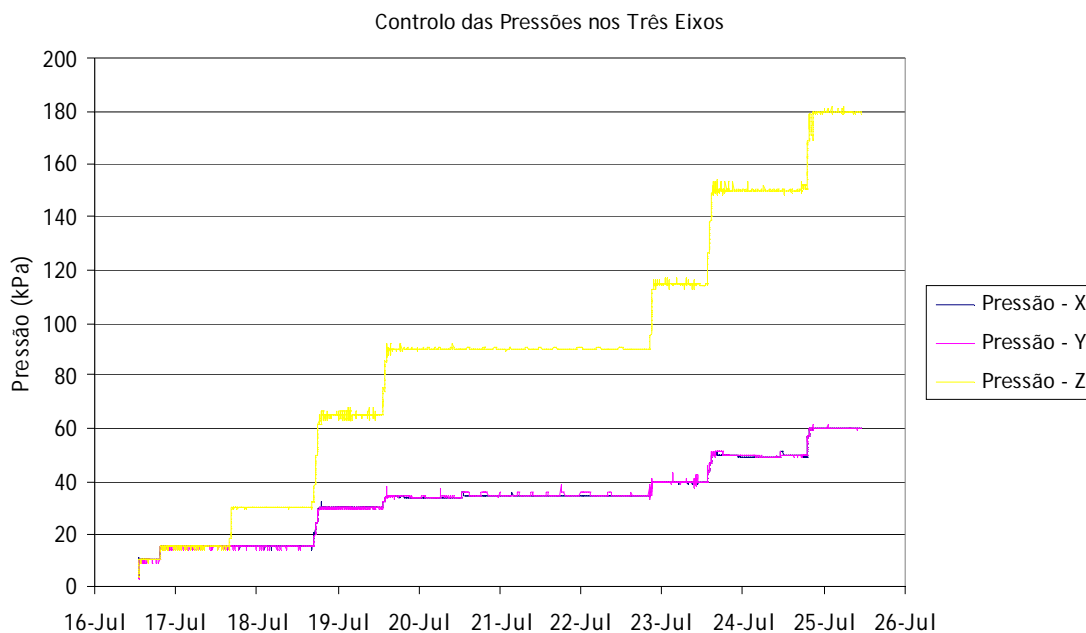
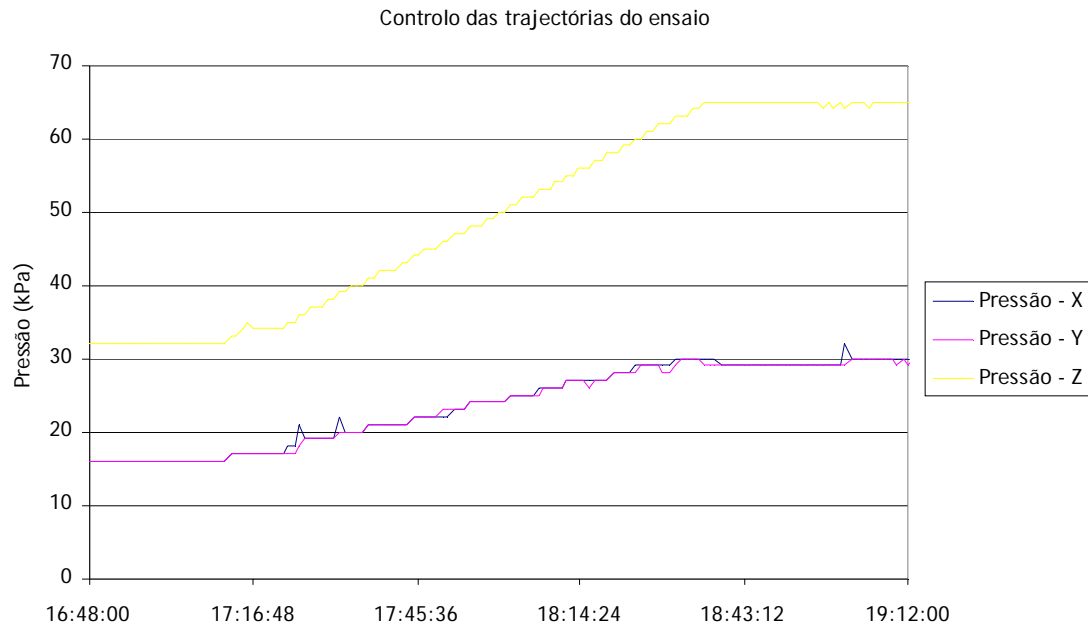


Fig. 33: Controlo em Pressão nos três Eixos do CUBO

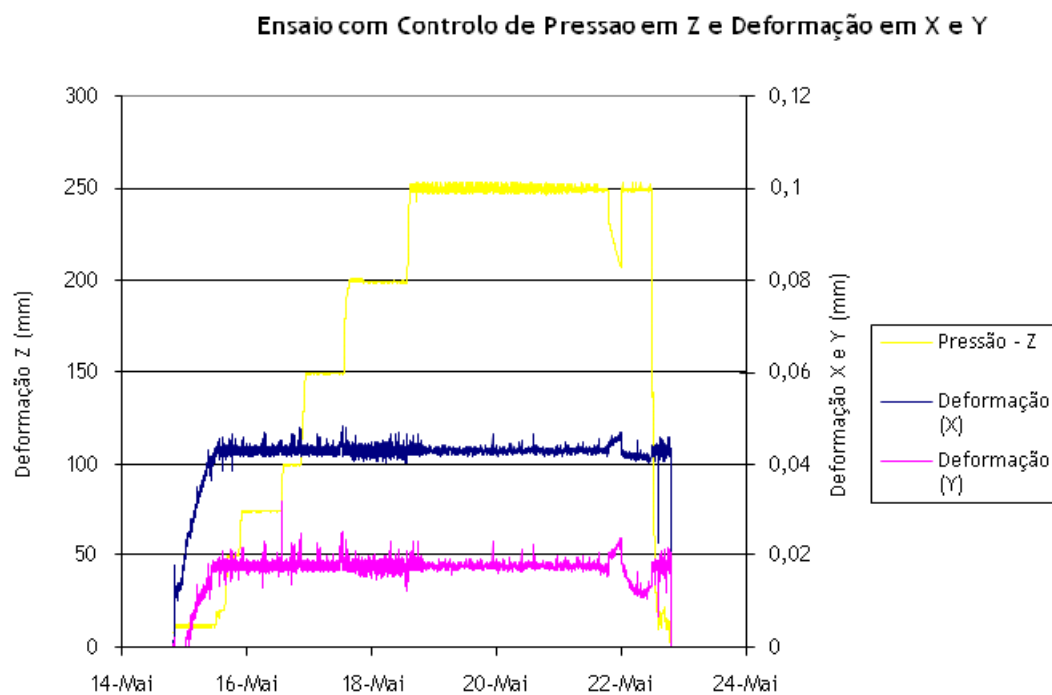
O gráfico da Fig. 33 representa o traçado das pressões de um ensaio triaxial verdadeiro, controlando os três eixos em simultâneo. Pelo gráfico observa-se que a evolução da rampa dos actuadores é diferente, necessitando de um maior tempo para concluir a rampa no eixo Z (axial). De acordo com o

que o foi dito, há um movimento solidário entre os valores enviados para os três actuadores, fazendo com que o aumento de pressões seja percentualmente igual. Desta forma, mesmo que os actuadores tenham que desenvolver rampas diferentes, o tempo que cada um demorará a atingir o seu valor final será sempre igual, fazendo com que o movimento dos actuadores seja solidário entre eles.



*Fig. 34: Controlo das Trajectórias*

No gráfico da *Fig. 35* está representado um traçado de um ensaio triaxial verdadeiro, onde há um controlo de deformação no eixo X e Y enquanto se pressiona verticalmente (eixo Z) a amostra de solo. O gráfico permite concluir que neste tipo de ensaios a aplicação desenvolvida também cumpre os requisitos inicialmente propostos.



*Fig. 35: Controlo por Deformação*

## 4 Monitorização e Controlo do Ensaio Triaxial Clássico

As características do solo podem ser obtidas através de diversos ensaios padronizados, entre eles o ensaio triaxial clássico é provavelmente um dos mais utilizados por apresentar bons resultados. Para a sua realização são necessários diversos equipamentos, dos quais se salientam: câmara triaxial (*Fig. 36*), os transdutores e os actuadores.



*Fig. 36: Câmara de Ensaio Triaxial Clássico*

Muitos ensaios triaxiais clássicos podem ser realizados manualmente não necessitando de equipamento de controlo, já que periodicamente os valores das pressões aplicadas podem ser actualizados pelo utilizador através de mudanças de referência no sistema. Contudo, este não é o melhor método de

actuar no sistema, pois provoca perturbações que poderiam ser evitadas recorrendo a um controlo automático do ensaio, onde é possível estabelecer rampas controladas evitando-se as indesejáveis mudanças em degrau no sistema.

O sistema desenvolvido para a realização dos ensaios triaxiais clássicos resultou de uma reabilitação de outro já existente no laboratório, que ao longo do tempo foi ficando ultrapassado. Esse sistema foi desenvolvido no início dos anos 90 e resultou de uma parceria entre o departamento de *Engenharia Civil* e o departamento de *Engenharia Mecânica e Gestão Industrial* da FEUP [1][2][3]. O trabalho realizado no âmbito desta dissertação de mestrado consistiu na reabilitação desse sistema dotando o laboratório de uma nova plataforma de ensaios triaxiais adaptada aos requisitos actuais dos utilizadores.

A arquitectura do sistema pode ser visualizada na Fig. 37.

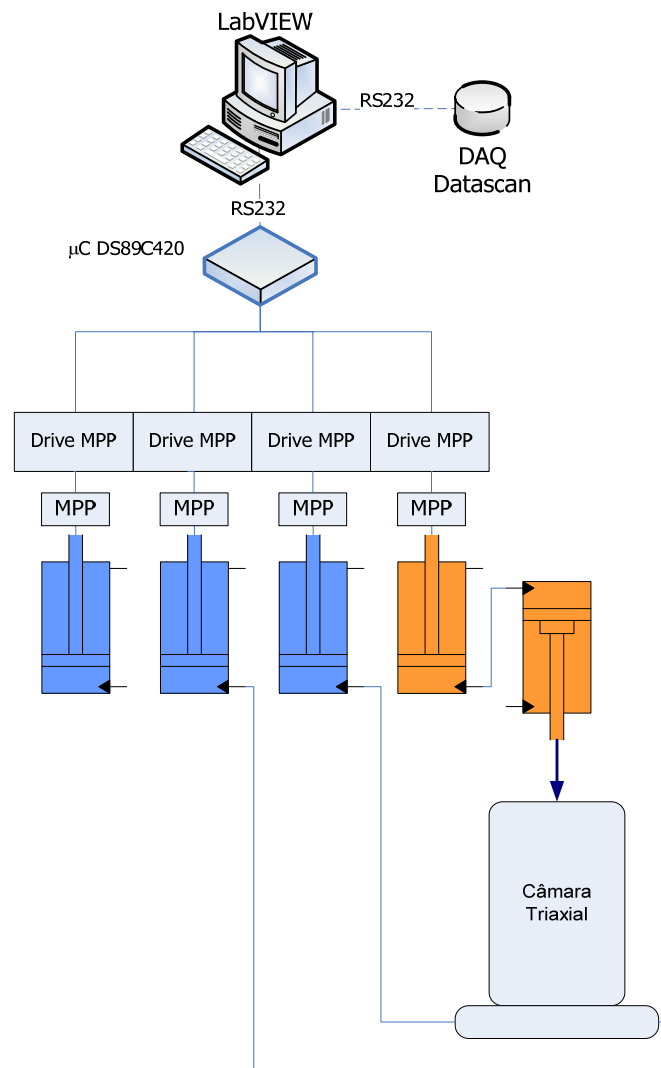


Fig. 37: Arquitectura do Sistema



De uma forma simplificada, a aplicação desenvolvida em LabVIEW envia uma referência de velocidade de cada motor para o  $\mu C$  (microcontrolador). Este, por sua vez, envia uma sequência de impulsos para os motores fazendo com que estes produzam o movimento correspondente, alterando a pressão instalada. A azul mais escuro estão representados os actuadores que utilizam água como meio de transmissão de pressão e a castanho o que utiliza óleo.

Nos ensaios triaxiais clássicos, à semelhança dos triaxiais verdadeiros, é aplicado uma força axial no provete. Contudo, a câmara utilizada tem uma forma cilíndrica em vez de cúbica. Para simplificação do sistema, a força axial é aplicada utilizando um actuador do mesmo tipo interligado com um cilindro standard. O óleo utilizado neste cilindro foi escolhido de modo a minimizar o atrito e não deteriorar os vedantes. O *MPP* (motor passo a passo), ao fazer avançar o actuador, leva a um aumento da pressão do óleo no interior do cilindro e, consequentemente, da força axial aplicada no provete.

O Datascan pode ser ligado ao computador de duas formas: por intermédio do  $\mu C$  ou directamente ao PC, através de RS232. Nos testes iniciais utilizou-se a primeira solução que não se mostrou muito interessante durante o teste de validação de vários tipo de actuadores ('SAIC', GDS, prensas), já que era obrigatório o uso do  $\mu C$  para a aquisição de dados, o que era bastante incómodo. Dessa forma optou-se por incluir no software a possibilidade do utilizador decidir a configuração desejada para a aquisição de dados do sistema, ou seja, directamente pelo PC ao recorrendo ao  $\mu C$ .

Na *Fig. 38* está representado um diagrama com o funcionamento simplificado do sistema.

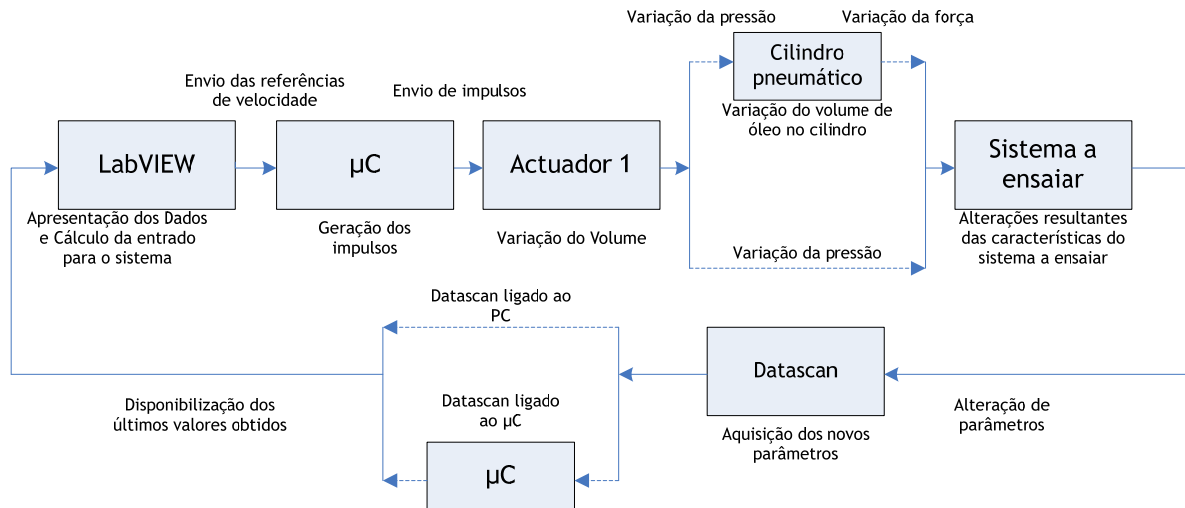


Fig. 38: Diagrama de Blocos do Sistema

#### 4.1 Comando dos MPP

Para o comando dos actuadores foi necessário desenvolver hardware específico, constituído por duas placas de isolamento de sinais e uma placa controladora baseada no  $\mu C$  DS89C4X0. Embora a aplicação nem sempre necessite do  $\mu C$  para actuar o sistema triaxial clássico (nomeadamente no modo de controlo manual e na monitorização), este assume grande importância, pois é o único que comanda os actuadores ‘SA/C’. Aliás, na proposta inicial os únicos actuadores a utilizar neste tipo de ensaios seriam os ‘SA/C’, mais tarde é que se tornou possível o uso de outro tipo de actuadores, conforme mencionado no capítulo 2.

Como é do conhecimento geral, para o comando de um MPP é necessário gerar uma sequência de impulsos para cada um dos pontos dos enrolamentos dos motores. Para isso foram utilizados os *drivers* usados no sistema anterior que se encontravam em funcionamento e cumpriam os requisitos definidos. Com estes *drivers*, que serão apresentados com maior pormenor mais à frente, o  $\mu C$  só necessita de enviar dois sinais por cada MPP (o impulso e o sentido de rotação).

Entre as soluções discutidas inicialmente, pensou-se na possibilidade de se utilizar a placa de aquisição de dados com saídas digitais para se enviar os sinais para os drivers dos MPP. Contudo, esta solução foi abandonada devido

à necessidade de isolamentos, alimentação dos drivers dos motores, etc; além disso, a aplicação teria de gerar os impulsos para os *drivers*, tornando-a muito exigente para o *PC*. O uso de uma solução baseada num  $\mu C$  é certamente a solução mais vantajosa.

Este  $\mu C$  foi escolhido por possuir duas portas de comunicação série permitindo ligar o *PC* e o sistema de aquisição de dados em simultâneo. Este  $\mu C$  da *Dallas*, com uma arquitectura baseada nos 80c51, tem como principal característica a velocidade de processamento, baseada num cristal de 33 *MHz*, ao contrário dos tradicionais 80c51, de desempenho 12 vezes inferior para o mesmo cristal. As características mais relevantes deste  $\mu C$  são:

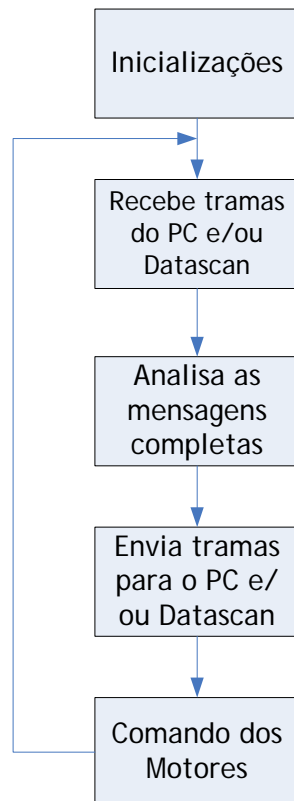
- Tem 16kB, 32kB ou 64kB de memória *Flash*, dependendo do modelo;
- 1kB de *RAM* interna;
- Quatro portas de 8 bit *I/O*;
- Três *timers* de 16 bit;
- Cinco sinais para interrupções externas;
- Possibilidade de variar a frequência de funcionamento para reduzir os consumos de energia.

De uma forma geral as principais funções do  $\mu C$  no sistema serão as seguintes:

- Receber ordens do *PC*, ou de um painel manual, para o comando dos *drivers* dos *MPP*;
- Obter o estado dos fins-de-curso dos actuadores;
- Obter leituras do sistema de aquisição de dados e enviar para o *PC*.

#### **4.1.1 Programa Implementado no $\mu C$**

Nas próximas páginas serão apresentadas as linhas gerais do programa desenvolvido para o  $\mu C$ . De uma forma simplificada, o código implementado pode ser representa pelo esquema da *Fig. 39*.

Fig. 39: Diagrama de Funcionamento do  $\mu C$ 

Como se pode verificar o programa irá ter um funcionamento cíclico. Simplificadamente, irá adquirir a informação do *Datascan*, caso esteja assim estabelecido, depois irá analisar as possíveis tramas, resultando dos bytes recebidos do *PC*. Por último envia as tramas de resposta para o *PC* e, se for caso disso, os impulsos para os *MPP* dos actuadores '*SAIC*'.

De seguida é apresentado o código da função *Main()*. As variáveis auxiliares *recv\_x*, *state\_x* e *start* asseguram o correcto funcionamento do programa.

```

void main()
{
    inicia_tudo();
    ...
    ..
    .
    while(1)
    {
        RS_232();
        if (recv_0==2)
            Analysys_Serial0();
        if (recv_1==2)
            Analysys_Serial1();
        if(state_1!=0 || state_0!=0)
            send_str();
    }
}

```

```

    if(start==1)
        RLX_Y();
        test_clk();
    }
}

```

Nos próximos parágrafos serão apresentadas as funções mais importantes desenvolvidas.

#### 4.1.1.1 Aquisição de dados

Se na aplicação *LabVIEW* estiver seleccionada a opção de aquisição de dados com recurso ao  $\mu C$ , esta executa a sequência da Fig. 40. Após receber este pedido o  $\mu C$  inicia a aquisição dos dados do *Datascan* e envia-os para o *PC*.

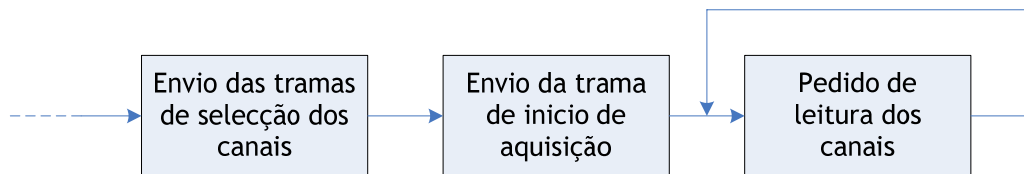


Fig. 40: Digrama da Aquisição de Dados do PC

Na Fig. 40 distinguem-se três fases distintas do procedimento executado para a aquisição de dados via  $\mu C$ . A primeira é uma selecção dos canais ligados ao *Datascan* cuja informação se deseja saber. Para isso o *PC* envia a trama representada na Fig. 41 para o  $\mu C$ .

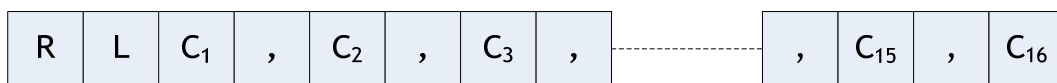


Fig. 41: Trama de Selecção de Canais

Os valores de  $C_1$ ,  $C_2$ , etc. poderão ser '1' ou '0'. Quando for '1' significa que se deseja ler a informação do respectivo canal, caso contrário deverá ser '0'. De modo a sinalizar o fim de mensagem é usado o caractere "\$" em todas as tramas trocadas entre os dispositivos.

A segunda parte corresponde ao envio de outra trama para o  $\mu C$  para se iniciar a aquisição, 'SS' (*Start Scan*), ver Fig. 42a. Quando se pretende que o  $\mu C$  deixe de comunicar com o *Datascan* deve ser enviada a trama 'ST' (*Stop*

Scan), ver Fig. 42b.

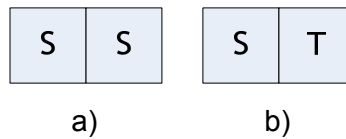


Fig. 42: Trama de Início(a) e Fim(b) de Aquisição

Após se enviar a ordem de início de aquisição de dados para o  $\mu C$ , devem ser feitos os pedidos de recepção com a informação relativa aos transdutores. A trama a enviar é composta por quatro caracteres e está representada na Fig. 43, (RDCH – read channels).

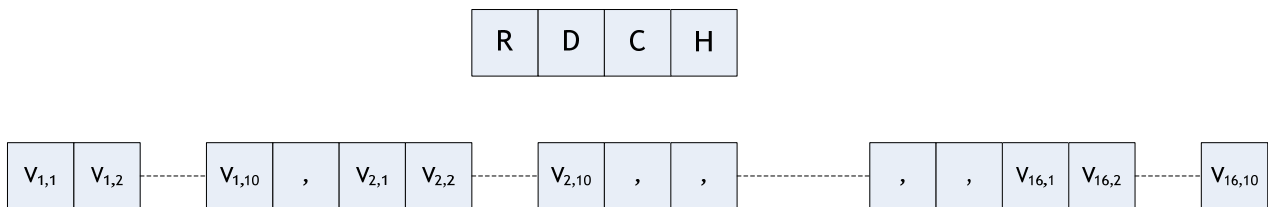


Fig. 43: Pedido de Leitura e Resposta da Informação dos Canais

O  $\mu C$  responde a um pedido de leitura enviando uma trama com a informação de cada canal, previamente seleccionado. Para indicar a separação da informação dos canais é utilizado o caractere ',', assim, quando existem duas vírgulas seguidas significa que a leitura desse canal não foi seleccionada, e não sendo por isso enviada.

Até ao momento foram apresentadas as tramas que são enviadas e recebidas pelo *PC*. Contudo, para o  $\mu C$  disponibilizar toda a informação atempadamente tem de executar várias funções.

#### 4.1.1.2 Recepção de Tramas

A recepção de tramas é desencadeada pela função *RS\_232()*. É a única forma do  $\mu C$  comunicar com outros equipamentos.

No fluxograma da Fig. 44 pode ser visualizado a estrutura simplificada desta função.

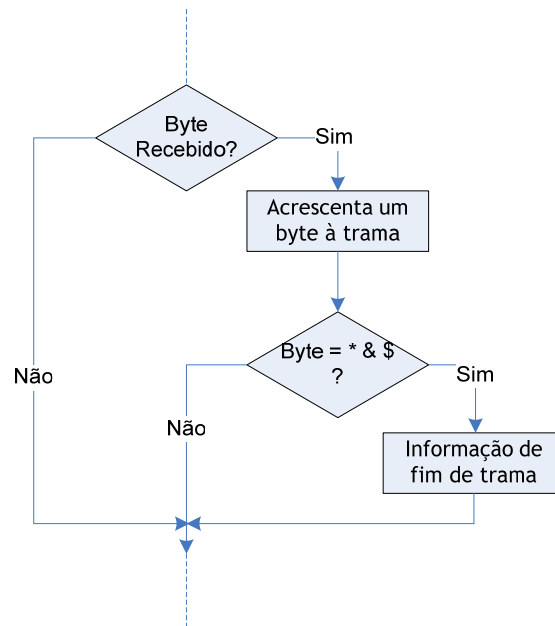


Fig. 44: Fluxograma Esquemático da Recepção das Tramas

Como é do conhecimento geral, os  $\mu C$ 's recebem as tramas *byte a byte*, o que torna necessário haver um mecanismo para controlar essa recepção. Este controlo da trama de recepção é iniciado quando um novo *byte* é recebido pelo  $\mu C$ . De seguida, esse *byte* e os seguintes são acrescentados a uma trama temporária que os irá armazenar. A indicação de fim de trama é obtida pela aquisição de um *byte* igual '\*' ou '\$', que faz com que a variável 'recv\_x', mencionada anteriormente, assumo o valor '2' indicando que uma nova trama está pronta para ser analisada.

Para além do valor '2' a variável 'recv\_x' pode assumir outros dois valores com significados diferentes. Esta variável assume o valor '0' quando está a receber informação e '1' quando a trama recebida está incompleta.

A análise das tramas é efectuada na função *Analisis\_Serial0( )*. Pela leitura do cabeçalho da trama o  $\mu C$  identifica o tipo de trama e inicia a respectiva função. De seguida é apresentado um exemplo.

```

if(serial_0[0]=='S' && serial_0[1]=='S')
{
  start=1;
  x=1;
  y=0;
}

```

Neste exemplo o PC dá indicação ao  $\mu C$  para iniciar a aquisição de dados do

*Datascan*. No sentido contrário, para o  $\mu C$  enviar os dados para o PC, necessita de comunicar com o *Datascan*, pelo que utiliza as tramas construídas na função *RLX\_Y()*.

As tramas enviadas para o *Datascan* são do tipo '*RLx,y*' em que resposta contém os dados da aquisição desde o canal '*x*' ao '*y*'. Nas situações em que se deseja obter a informação de canais que não são seguidos é necessário enviar-se mais que uma trama. VER CÓDIGO Nº5 (exemplo)

```
void RLX_Y()
{
    bit some=0;
    while((ChToRead[y]=='1' || some==0) && y<17)
    {
        if (ChToRead[y]=='1')
            some=1;
        else
            x++;
        y++;
    }
    ...
}
```

Antes do código desta função ser executado o valor '*x*' tem o valor de '*1*' e '*y*' de '*0*'. A variável '*some*' passa a '*1*' quando se detectar que existe algum canal seleccionado para a aquisição. Esta primeira parte do código permite saber se existem canais para serem lidos, consultando um vector de 16 elementos com os valores obtidos da trama de selecção de canais.

Se se desejar a aquisição do canal correspondente a *ChToRead[y]* então a variável '*some*' assume o valor '*1*' e '*y*' é incrementado. No ciclo seguinte é necessário que '*ChToRead[y]*' possua o valor '*1*' para a condição '*while*' ser verdadeira. Se isso acontecer significa que queremos ler dois canais seguidos. Este pequeno ciclo parará quando a variável '*ChToRead[y]*' for '*0*' ou '*y*' atingir o valor '*16*'. Caso a variável '*ChToRead[y]*' seja '*0*', então os valores '*x*' e '*y*' ficarão determinados. Desta forma a trama fica definida, sendo só necessário passar os valores de '*x*' e '*y*' para *ASCII*, para construir a *string* a enviar para o *Datascan*.

```
...
if(some!=0 && x<=y)
{
    // construção da trama
    serial_1[0]='R';
}
```



```

serial_1[1]='L';
if(x<10)
{
    serial_1[2]=x+48;
    serial_1[3]=',';
    if(y<10)
    {
        serial_1[4]=y+48;
        serial_1[5]=13;
    }
    else
    {
        serial_1[4]='1';
        serial_1[5]=y+48-10;
        serial_1[6]=13;
    }
}
else
{
    serial_1[2]='1';
    serial_1[3]=x+48-10;
    serial_1[4]=',';
    serial_1[5]='1';
    serial_1[6]=y+48-10;
    serial_1[7]=13;
}
state_1=3;
index_1=0;
AQ_Val_state='r';
channel_num=x-1;
char_num=0;
}
...

```

Analisando a tabela de códigos *ASCII*, na conversão de um valor inteiro, compreendido entre 0 e 9, basta somar '48'. Como o valor máximo é '16', quando for superior a '9' basta colocar o primeiro byte igual '1' (com o valor correspondente em *ASCII*), que equivalerá ao algarismo das dezenas do número do canal. O segundo byte será a diferença do número do canal e '10' que é igual algarismo das unidades do número do canal) com a soma de '48', ficando o valor em *ASCII*. Depois é adicionado o caractere da vírgula seguido do número do canal definido por 'y'.

Com a trama completa altera-se o valor da variável 'Aq\_Val\_State', indicando que irão ser recebidos novos valores para serem guardados no respectivo vector de dados a partir da posição 'channel\_num'.

```

...
if(y>15)
{
    x=1;
    y=0;
    if(AQ_Val_state!=0)

```

```
        start=2;
    else
        start=1;
    }
else
{
    start=2;
    y++;
    x=y+1;
}
}
```

Esta última parte tem que existir para garantir o funcionamento contínuo da aquisição, permitindo que o programa volte ao estado inicial, com ' $x=1$ ' e ' $y=0$ '.

Logo após a transmissão das tramas para o *Datascan*, o  $\mu C$  ficará a aguardar a resposta. Quando a trama recebida fica completa é executada a função *Analisis\_Serial1()*, em que neste caso o terminal de comunicações entre o  $\mu C$  e o *Datascan* é o '*Port1*'.

Como esta função analisará as tramas recebidas do *Datascan* será mais curta que a função correspondente à comunicação com o PC. Neste caso só receberá as tramas com os valores dos transdutores. O fluxograma da Fig. 45 representa o código desta função.

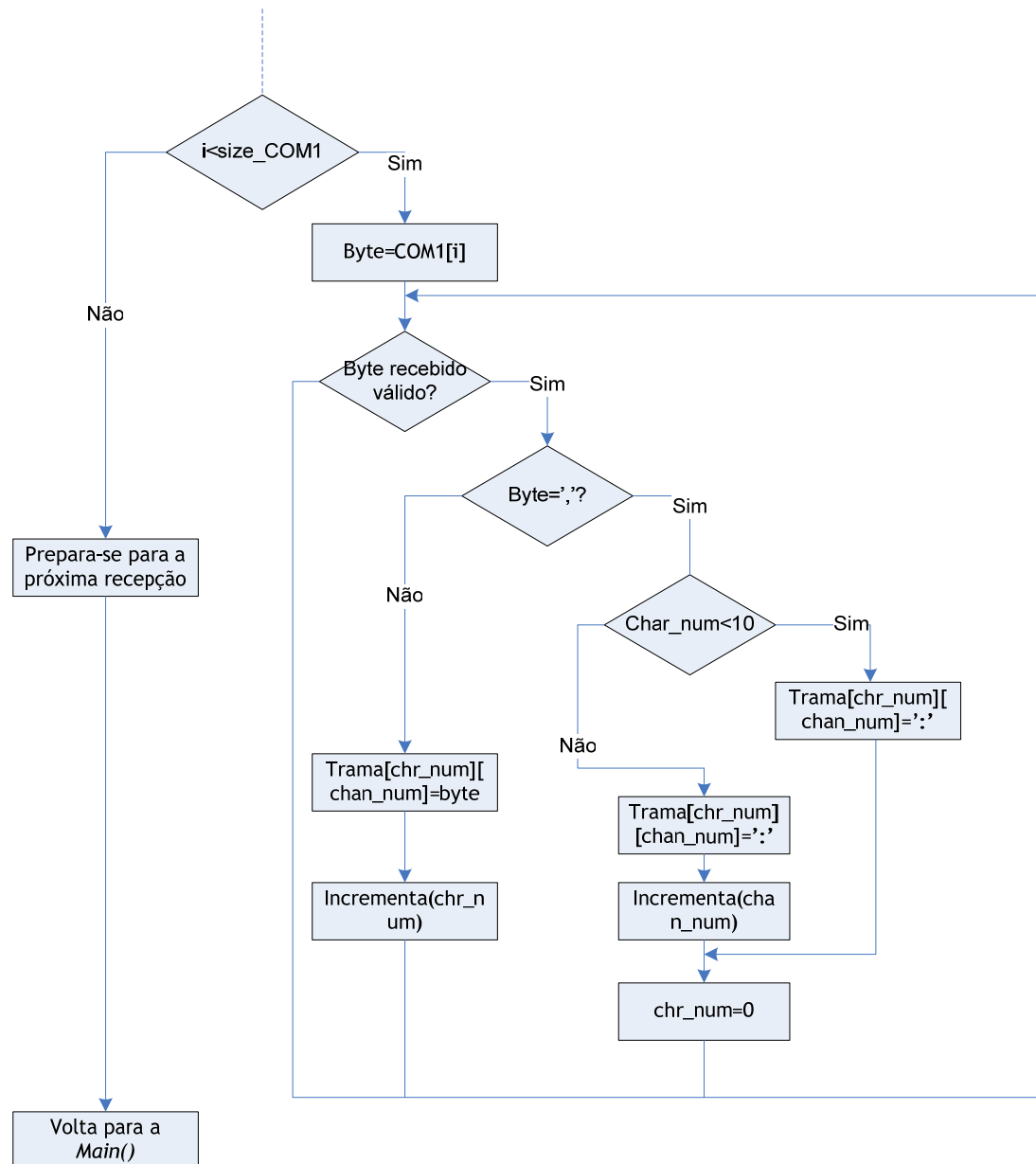


Fig. 45: Fluxograma da Recepção dos Valores dos Canais do Datacan

É importante salientar que para esta função ser executada o *Datacan* tem de enviar a respectiva trama e termina-la com '\$' ou '\*'. Os dados dos canais são guardados num vector, com 10 caracteres por elemento, assim quando aparece 'Aq\_Val[char\_num][channel\_num] = byte', significa que se está a copiar o respectivo byte para a posição 'char\_num' do canal 'channel\_num'. No caso do byte ser ',' significa que terminou a informação associada a um canal iniciando-se a recepção da informação do canal seguinte.

Para o envio de tramas pelos dois terminais de comunicação série é utilizada a função *send\_str()*. O seu funcionamento está representado na Fig. 46.

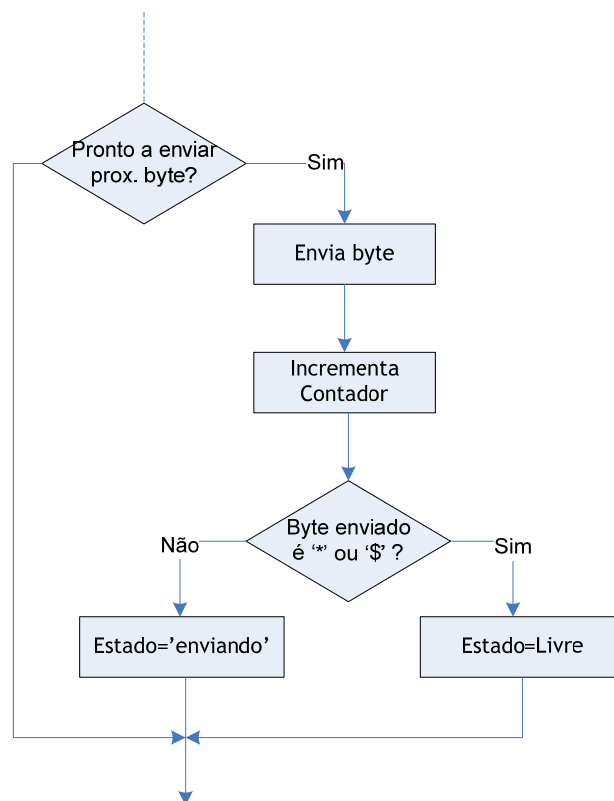


Fig. 46: Fluxograma do Envio de Bytes pela Porta Serie

#### 4.1.1.3 Comando dos motores

Outra tarefa que o  $\mu C$  tem é o envio de impulsos para os *drivers* dos *MPP*, implementada na função *test\_clk()*. A trama enviada do *PC* para o  $\mu C$  contém o sentido e a velocidade desejada para cada motor e está representada na Fig. 47.

V	M	S <sub>1</sub>	V <sub>L1</sub>	V <sub>M1</sub>	S <sub>2</sub>	V <sub>L2</sub>	V <sub>M2</sub>	S <sub>3</sub>	V <sub>L3</sub>	V <sub>M3</sub>	S <sub>4</sub>	V <sub>L4</sub>	V <sub>M4</sub>
---	---	----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------	----------------	-----------------	-----------------

Fig. 47: Trama de Comando dos MPP

O cabeçalho da trama será sempre 'VM' (*Velocidade Motor*) e Sx terá o valor '0' ou '1' consoante o sentido de rotação desejado. Os bytes  $V_{LX}$  (menos significativo) e  $V_{MX}$  têm a informação relativa ao número de passos para cada *MPP*, em que:

$$Passos = V_{LX} + V_{MX} \cdot 256 \quad (4-1)$$

Para além deste tipo de ordem, existe também um comando manual no painel que permite definir o movimento do *MPP* que está representado mais à frente na *Fig. 51*.

Para controlar a acção do painel e da informação enviada pelo PC, o  $\mu C$  verifica primeiro se está algum comando manual pressionado. Caso essa condição seja verdadeira, a variável '*Passos*' do *MPP* é actualizada com o valor de velocidade previamente estabelecido para o comando manual. Se o sentido do movimento pretendido corresponder a um fim-de-curso activo então a variável '*Passos*' é feito o *reset* e o motor não se desloca. Caso contrário, é gerada uma sequência de impulsos que é enviada para o driver do *MPP*. O  $\mu C$  enviará essa sequência de impulsos durante um período máximo de dois segundos desde a última actualização de velocidade. Assim, garantimos que caso aconteça algo à aplicação ou ao PC, em que não é actualizada a velocidade, os actuadores param diminuindo os riscos de danificar uma amostra de solo.

#### **4.1.2 Placas Circuito Impresso Desenvolvidas**

Para suportar o sistema de comando tiveram de ser desenvolvidas algumas placas para permitir à aplicação do PC comandar o sistema. Assim, foram desenvolvidas dois tipos de placas: uma com o  $\mu C$  e outra para fazer o isolamento de sinais entre o  $\mu C$  e os drivers dos *MPP*.

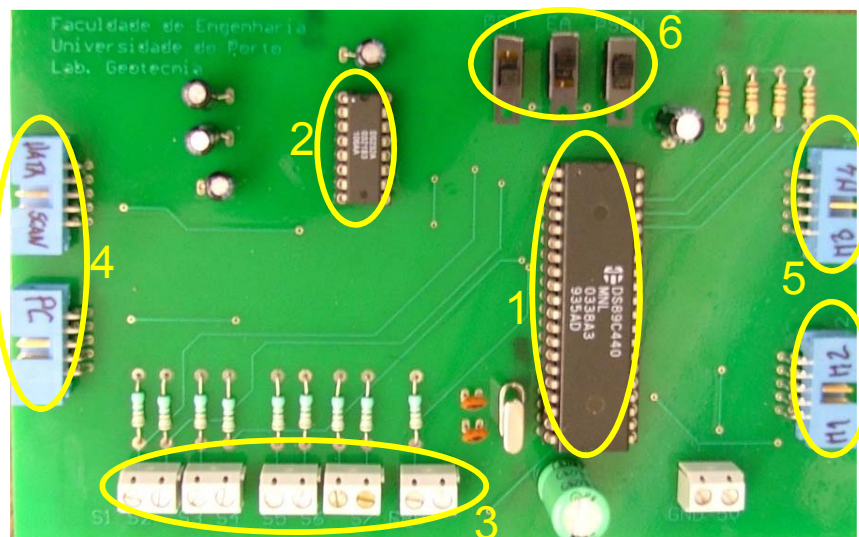
##### **4.1.2.1 Placa controladora**

Esta placa recebe as informações enviadas pela aplicação do PC e *Datascan* e envia os impulsos para os *MPP*. As ordens são recebidas via comunicação série (*RS232*), utilizando-se o circuito integrado *MAX232*, que é a

solução mais comum neste tipo de aplicações.

Em anexo, *Fig. 78*, está representado o circuito electrónico implementado na placa de circuito impresso e cuja fotografia é apresentada na *Fig. 48*, onde se salientam os seguintes elementos:

1.  $\mu$ C DS89C420 da *Dallas*;
2. *MAX232*, utilizado nas comunicações série;
3. Terminais de ligação dos sinais enviados do painel;
4. Terminais para ligação das portas série;
5. Terminais com os sinais a serem enviados para os drivers e com o estado dos fins-de-curso;
6. Interruptores usados na programação *In-Circuit* do  $\mu$ C.



*Fig. 48: Placa com o  $\mu$ C*

#### 4.1.2.2 Placas de Isolamento

Foi desenvolvida uma placa com acopladores ópticos para o isolamento das entradas e saídas do  $\mu$ C e adaptação dos níveis de tensão de 5V para 15V, *Fig. 49*. Os elementos principais da figura são:

1. Terminal com os sinais a serem enviados para os drivers e com o estado dos fins-de-curso;

2. Terminais com os sinais enviados directamente para o driver e com os fins-de-curso;
3. Alimentação de 15V, que é comum aos drivers;
4. Alimentação de 5V, que é comum ao  $\mu C$ ;
5. Circuito integrado comparador, LM239.

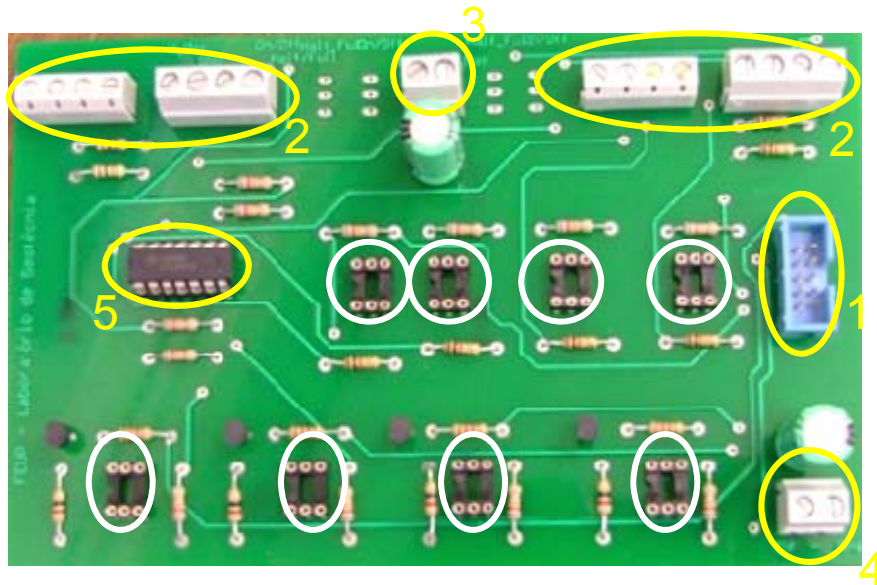


Fig. 49: Placa de Isolamentos

Estão assinalados a branco os *sockets* para os opto-acopladores (4N25) que fazem o isolamento entre os sinais do  $\mu C$  e os sinais enviados para os *drivers*. Dado que a corrente de saída do  $\mu C$  é muito limitada foi necessário introduzir transístores de sinal na entrada dos opto-acopladores. De modo semelhante, as saídas dos opto-acopladores estão ligadas a um amplificador operacional para alimentarem as entradas dos drivers. No anexo, na Fig. 79 está representado o correspondente esquema do circuito electrónico.

#### 4.1.3 Funcionamento do Sistema de Comando dos MPP

O *hardware* do sistema de comando dos MPP foi montado num armário eléctrico e é constituído pelos seguintes elementos:

- Painel de comando manual;
- Placa com o  $\mu C$ ;

- Duas placas de isolamento de sinais;
- Fontes de alimentação de 5 Volt e 15 Volt;
- *Drivers* para os *MPP*.

Como foi referido atrás, foi implementada a possibilidade de comandar o sistema manualmente, através de um painel, ou então por intermédio do *PC*. Na situação em que o *PC* está a controlar o sistema e em simultâneo um utilizador faz uso do painel de comando manual, o sistema dá prioridade ao segundo.

Para facilitar os comandos dos diferentes motores por parte do utilizador, foi utilizado uma codificação por cores, em que o primeiro actuador é o amarelo, o segundo o azul, o terceiro vermelho e o quarto o verde. No interior do armário eléctrico foram também utilizadas estas cores para melhor compreensão das ligações existentes, mantendo-se a mesma correspondência no interface gráfico com o utilizador.

Na *Fig. 50* são apresentadas duas imagens do armário eléctrico.



*Fig. 50: Armário Eléctrico*

Pelo comando manual, o utilizador tem a possibilidade de controlar os actuadores em duas velocidades diferentes. Na *Fig. 51* é apresentada uma



imagem do painel de comando manual.



*Fig. 51: Painel de Comando Manual*

## 4.2 Aplicação LabVIEW

Uma das partes mais importantes do sistema é sem dúvida o *software* desenvolvido para a monitorização e controlo do ensaio. Além disso, esta aplicação é responsável pelo controlo e aquisição de dados. Na Fig. 52 é apresentado um interface da aplicação.



Fig. 52: Vista geral da Aplicação

Na zona superior esquerda encontra-se um painel que permite ao utilizador visualizar as variáveis adquiridas directamente do *Datascan*. Do mesmo lado, mas na parte inferior, está um conjunto de botões que permite ao utilizador aceder a outras funções da aplicação, como por exemplo: configuração, controlo, comando manual, calibração, etc. Todas estas funcionalidades são apresentadas do lado direito da interface.

### 4.2.1 Interfaces da Aplicação

#### 4.2.1.1 Aquisição e Monitorização

Na *Fig. 52* pode ser visualizado o interface da aquisição de dados. No painel do lado esquerdo, através da navegação entre os seus diferentes *Tabs* (separadores), é possível a selecção dos canais para aquisição e fazer o *Reset*, estabelecendo uma nova referência para o canal pretendido. Se se pretender gravar os sinais adquiridos no disco, deve ser inserido o nome do ficheiro e seleccionado o tempo de aquisição no painel apresentado do lado direito.

Para facilitar a monitorização ao longo dos ensaios triaxiais é possível ver os dados graficamente clicando no botão *Charts*. Essa visualização permite ao utilizador seleccionar as variáveis para os eixos das ordenadas e das abcissas. Também é possível visualizar todas as variáveis relacionadas com o ensaio no separador *Variables*, contudo estes valores só serão actualizados quando um ensaio estiver a decorrer.

#### 4.2.1.2 Separador “Configurações”

Pressionando o botão ‘*Config*’ tem-se acesso ao menu de configurações do sistema triaxial, que é apresentado na *Fig. 53*. Na parte superior é possível seleccionar os actuadores e os terminais de comunicação com os outros equipamentos.

Uma opção que está presente neste separador é o botão ‘*Indirect – Direct*’, que corresponde à forma como o *Datascan* está ligado ao sistema. Caso esteja ligado ao *PC* deve ser seleccionado o estado “*Direct*”. Se por ventura o *Datascan* for ligado à ‘*Control Box*’ basta seleccionar o porto de comunicação que a interliga ao *PC*.

**Configurations** ?

**Actuators type:**

Actuator Type n°1: OFF

Actuator Type n°2: OFF

Actuator Type n°3: OFF

Actuator Type n°4: OFF

---

**Communications**

Control Box: COM1 Indirect Direct

Datascan: COM1

---

**Other equipment:**

GDS Serial Port: COM2

WFI Triech 50kN: ASRL2::INSTR

ELE Digital Tester: ASRL2::INSTR

Fig. 53: Configurações da Aplicação

#### 4.2.1.3 Separador “Calibração”

Um aspecto importante da aplicação é a caracterização dos transdutores usados durante os ensaios. Para isso foi desenvolvido um módulo para essa caracterização de um transdutor que inclui os seguintes passos: a selecção do transdutor, aquisição de pontos de funcionamento e o cálculo dos coeficientes da função aproximadora (do tipo polinomial), Fig. 54.

Noutras aplicações, como por exemplo o *TRIAX*, cabe ao utilizador inserir o grau do polinómio desejado e o programa obtém os respectivos coeficientes. Contudo, esta aplicação determina automaticamente o polinómio, entre o segundo e o quinto grau, que melhor se ajusta aos dados experimentais.

Fig. 54: Painel de Calibração

#### 4.2.1.4 Controlo de Ensaios Triaxiais

Nos ensaios triaxiais para se inserir ordens de controlo é necessário recorrer a duas interfaces diferentes. Numa delas insere-se as condições iniciais do ensaio enquanto, na outra, é possível definir os diferentes estados do ensaio, Fig. 55.

Fig. 55: Definição dos estados de controlo do ensaio

Na interface do lado esquerdo da Fig. 55 insere-se as condições iniciais do ensaio como por exemplo: diâmetro da amostra, altura, massa, etc; além disso, deve-se fazer corresponder os transdutores utilizados no ensaio com o

respectivo parâmetro de controlo (célula de carga, deformação, pressões, etc).

Para definir os estados de controlo deve-se fazer corresponder os actuadores com o eixo de controlo associado ao sistema (*Cell*, *Back*, *Ram*). Depois disso devem ser inseridas as trajectórias para cada um desses actuadores que são definidas por: '*Hold Value*' (valor de partida), '*Rate*' (taxa de incremento) e a '*Control Equation*' (equação de controlo).

Para terminar o estado automaticamente devem ser definidas equações de alarme ('*Alarm Equation*') e as respectivas acções ('*Alarm Action*').

#### 4.2.1.5 Comando Manual

Além do modo de funcionamento normal, existe também a possibilidade de comandar manualmente o sistema via *PC*, *Fig. 56*, particularmente útil no posicionamento inicial sistema.

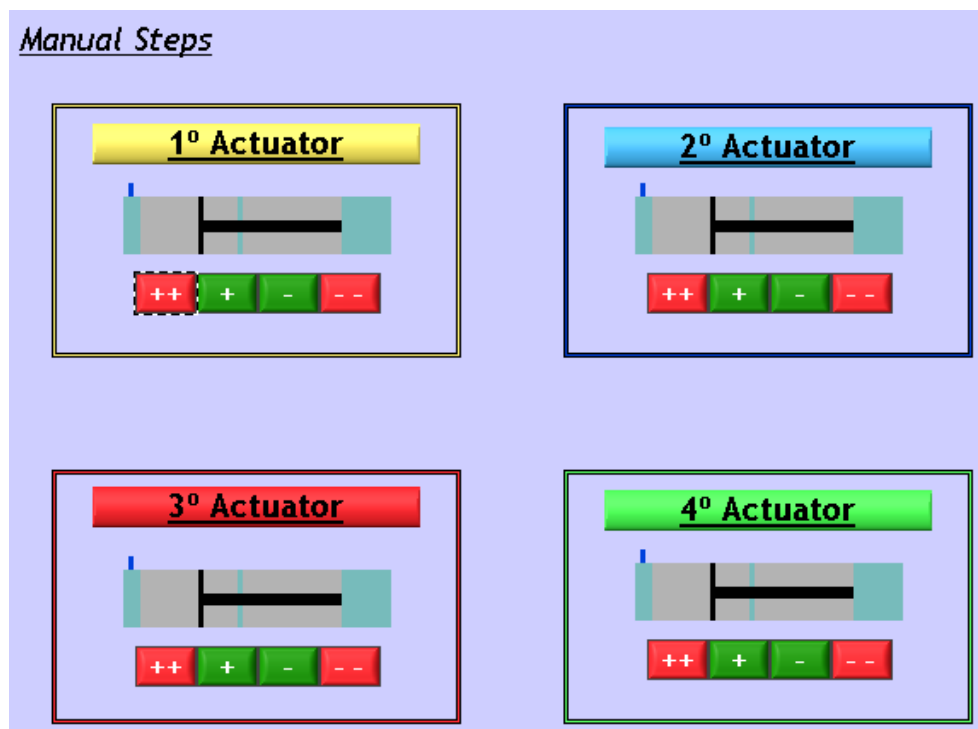


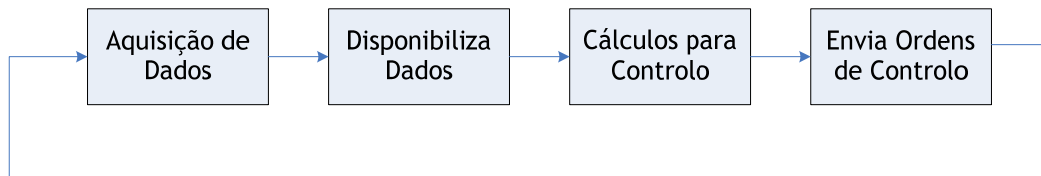
Fig. 56: Comando manual via PC

### 4.2.3 Programação em LabVIEW

O código do programa foi dividido em diferentes secções de acordo com a sua funcionalidade, correspondente aos separadores anteriormente apresentados:

- Aquisição e Monitorização:
  - Aquisição;
  - Cálculo das variáveis associadas ao ensaio;
  - Gráfico com a evolução das variáveis.
- Calibração;
- Controlo;
- Comando Manual.

Durante um ensaio as funções executadas são a Aquisição e Monitorização e a de Controlo. O fluxograma da *Fig. 57* representa um esquema simples do funcionamento cíclico da aplicação durante um ensaio.



*Fig. 57: Esquema do Funcionamento Geral da Aplicação*

#### 4.2.3.1 Aquisição e Monitorização

A aquisição e a monitorização engloba três funcionalidades. A primeira, a aquisição de dados propriamente dita, pode ser feita de duas formas dependendo do equipamento que faz a aquisição do *Datascan*: directamente pelo PC ou através da placa do  $\mu C$ .

Simplificadamente, este ponto alberga cinco separadores do programa principal, que são: '*Program Interaction*', '*Acquisition\_1*', '*Acquisition\_2*', '*Acquisition\_3*' e o '*Chart*', que podem ser visualizados na *Fig. 58*.

O primeiro separador – '*Program Interaction*' – contém as funções associadas ao funcionamento do programa, permitindo o utilizador a

visualização dos diferentes ecrãs da aplicação. Este é sem dúvida o separador com código mais simples.

Os separadores '*Acquisition\_X*' contêm o código associado à aquisição de dados do *Datascan*. Devido à quantidade de código necessário para este ponto foi dividido em três separadores a fim de se simplificar a compreensão para futuros utilizadores e programadores.

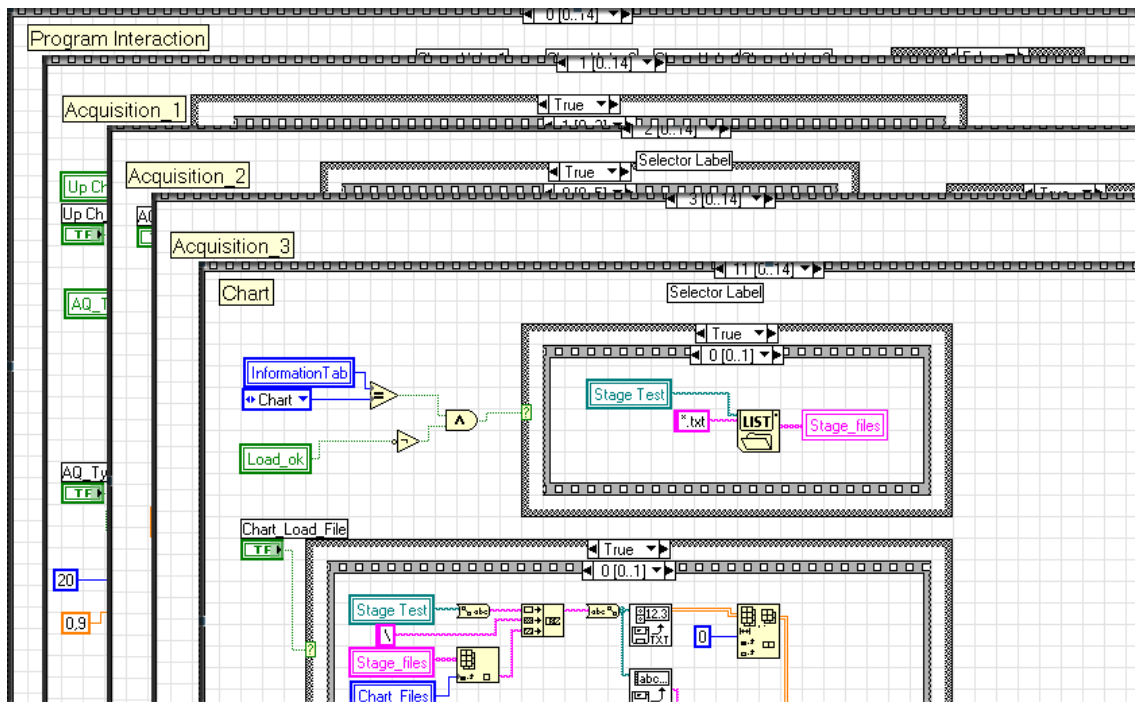


Fig. 58: Código relativo à Aquisição de dados

O separador '*Acquisition\_1*', o primeiro destes três separadores, tem duas tarefas relacionadas com a aquisição de dados: ligação ao *Datascan*/ $\mu C$  e a própria aquisição destes.

O separador '*Acquisition\_2*', contém o código que faz iniciar e terminar a aquisição de dados e também a gravação desses valores para o ficheiro seleccionado pelo utilizador.

O terceiro e último dos separadores, '*Acquisition\_3*', contém o código relativo ao *reset* dos transdutores. Quando é feito um *reset* a um transdutor o programa grava num ficheiro o valor respectivo para as futuras leituras serem afectadas desse valor. Salienta-se que o *reset* não tem de ser necessariamente feito em relação ao zero, mas sim em relação a um qualquer valor inserido pelo utilizador.



Por fim, no separador 'Chart' é apresentado um gráfico com as variáveis seleccionadas pelo utilizador (que podem ser quaisquer umas do ensaio).

#### 4.2.3.2 Calibração

Nesta secção foram desenvolvidos dois separadores com os nomes de 'Calibração\_1' e 'Calibração\_2'.

O mais simples é o separador 'Calibração\_2', que permite dar início à calibração, ao seu cancelamento, adição ou eliminação de um ponto para a calibração e também ler definições anteriores de um dado canal.

O separador 'Calibração\_1' permite calcular os valores do polinómio aproximador e validar a calibração através da visualização gráfica do resultado obtido.

Durante a monitorização do sistema, o *Datascan* adquire o sinal analógico do transdutor e envia-o para o *PC* que faz a conversão para as unidades de engenharia, utilizando o polinómio anteriormente definido.

Considerando o polinómio:

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_N \cdot x^N \quad (4-2)$$

em que 'y' é o valor em unidades de engenharia, 'x' é o valor enviado pelo *Datascan* e  $a_n$  os coeficientes do polinómio. A qualidade do polinómio pode ser mensurada pelo somatório dos quadrados dos resíduos:

$$\min_{a_0, a_1, \dots, a_N} S = \sum_{i=0}^m [y_i - (a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \dots + a_N \cdot x^N)]^2 \quad (4-3)$$

o que permite obter um sistema de equações através:

$$\frac{\partial S}{\partial a_k} = 0, \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4-4)$$

de onde resulta:

$$\begin{aligned}
 m \cdot a_0 + \sum_{i=1}^m x_i + \dots + a_N + \sum_{i=1}^m x_i^N &= \sum_{i=1}^m y_i \\
 a_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i + a_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 + \dots + a_N + \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} &= \sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \\
 &\dots \\
 &\dots \\
 a_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^N + a_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} + \dots + a_N + \sum_{i=1}^m x_i^{N+N} &= \sum_{i=1}^m x_i^N \cdot y_i
 \end{aligned} \tag{4-5}$$

Através de uma manipulação das equações pode-se simplificar matricialmente da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^N \cdot y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m \cdot a_0 & a_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i & \dots & a_N \cdot \sum_{i=1}^m x_i^N \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i & a_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^2 & \dots & a_N \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_0 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^N & a_1 \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} & \dots & a_N \cdot \sum_{i=1}^m x_i^{N+N} \end{bmatrix} \tag{4-6}$$

Este sistema tem  $N+1$  equações lineares nas  $N+1$  incógnitas ( $a_0 + a_1 + \dots + a_N$ ) que permitem determinar o polinómio aproximador.

O sistema matricial pode ser ainda simplificado para a seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^N \cdot y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^N \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^N & \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{N+N} \end{bmatrix} \times [a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_N] \tag{4-7}$$

O que equivale a ter

$$Y = X \times \theta \quad (4-8)$$

em que

$$\theta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot X^T \cdot Y \quad (4-9)$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^m y_i \\ \sum_{i=1}^m x_i \cdot y_i \\ \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^N \cdot y_i \end{bmatrix} = Y \quad \begin{bmatrix} m & \sum_{i=1}^m x_i & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^N \\ \sum_{i=1}^m x_i & \sum_{i=1}^m x_i^2 & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^m x_i^N & \sum_{i=1}^m x_i^{N+1} & \dots & \sum_{i=1}^m x_i^{N+N} \end{bmatrix} = X \quad [a_0 \quad a_1 \quad \dots \quad a_N] = \theta \quad (4-10)$$

Para se escolher o grau do polinómio que melhor se ajusta ao conjunto de pontos adquiridos, deve-se calcular o resíduo associado e obter o coeficiente de correlação correspondente, que é dado por:

$$r = \sqrt{\frac{S_t - S}{S_t}} \quad (4-11)$$

em que

$$S_t = \sum_{i=1}^m (y_i - y_{med})^2 \quad (4-12)$$

e  $y_{med}$  é a média dos valores. A aproximação será tanto melhor quanto mais próximo de '1' estiver o resíduo associado.

Neste trabalho o grau do polinómio está limitado a cinco. Este valor resulta da experiência acumulada das calibrações já efectuadas no *LabGeo*, em que, em geral, uma aproximação com um polinómio de grau um apresenta um erro bastante aceitável.

#### 4.2.3.3 Controlo

O código desenvolvido para o controlo do sistema foi distribuído por quatro separadores.

O primeiro destes separadores tem o código relativo à actualização da informação do estado activo e dos respectivos alarmes. O segundo separador contém o código para se guardar ou carregar essa informação do disco.

O ensaio triaxial (*Test*) é composto por uma sequência de vários estados (*Stages*). Cada estado define o modo como os actuadores devem comportar-se (evoluir linearmente ou manter uma das variáveis do ensaio).

Ao longo do ensaio são verificadas continuamente as condições de alarme e, caso alguma seja activada, é executada a acção pré-definida (ex. mudar de estado, parar o ensaio, etc).

As expressões de alarme, e a respectiva acção, são inseridas na forma de *string*, permitindo ao utilizador ter uma maior liberdade na sua definição. Por exemplo: se uma dada condição de alarme for '*cell-back+2\*sigv<20+q/2*', o que a aplicação fará é analisar onde se encontra o sinal de comparação da expressão (<, <=, >, >=) e depois, com recurso a uma lista de todas as variáveis do ensaio, substitui as letras ou palavras da expressão, realizando operações matemáticas definidas. Por último compara ambos os lados da expressão e analisa se a condição alarme é, ou não, verdadeira.

O controlo dos actuadores é feito de modo diferente. Por exemplo: se a equação de controlo de um eixo for '*sigv-0.3\*sigh*' será equivalente a ter '*cell+load-0.3\*cell*'. Se o eixo correspondente for o *CELL* então a aplicação substituiria na equação todas as variáveis pelo seu valor actual, exceptuando a variável *cell*, ou seja, ficaria '*cell+X-0.3\*cell=SETUP*', em que *X* equivale ao valor de '*load*' e *SETUP* ao valor desejado para a equação. Por fim a aplicação resolveria a equação determinando o valor de *cell*.

A *Tabela 7* do *Anexo.1* são apresentadas todas as variáveis que podem ser inseridas nas expressões do ensaio e a sua respectiva fórmula de cálculo.

#### 4.2.3.4 Comando Manual

É possível comandar manualmente o sistema usando quer o painel do

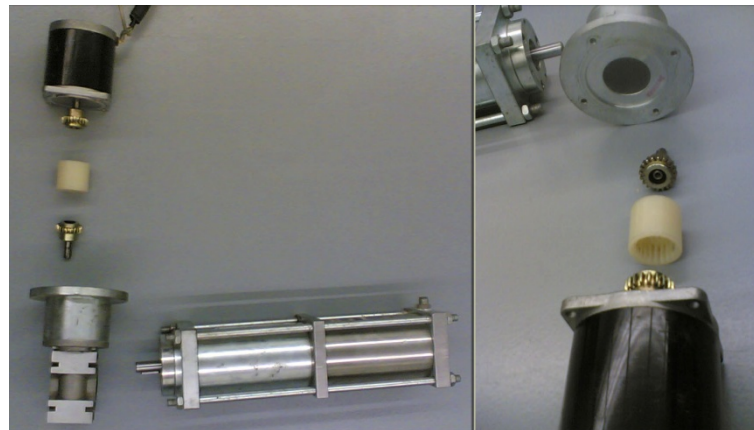
armário eléctrico (*Fig. 51*), quer pelo software (*Fig. 56*). O comando manual é particularmente útil no início do ensaio para fazer o posicionamento inicial dos actuadores e a sua purga.

### 4.3 Controlo dos Actuadores

Os actuadores *GDS's* possuem um controlador integrado de pressão e volume, os actuadores '*IC*' têm apenas uma válvula proporcional de pressão e os '*SAIC*' não têm qualquer elemento controlador, obrigando a um estudo destes últimos.

### 4.4 Comando dos Actuadores '*SAIC*'

Cada actuador é composto por um motor passo-a-passo (*MPP*), um sistema mecânico de transmissão de movimento e um cilindro hidráulico, *Fig. 59*.



*Fig. 59: Componentes do Actuador*

O actuador é comandado através de um *MPP* que, ao rodar um fuso, provocando o deslocamento linear do êmbolo.

Os motores dos actuadores são todos iguais e têm as seguintes características:

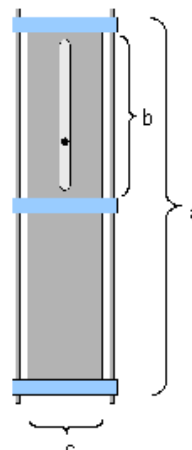
- Modelo PH299-03, do fabricante Vexta, Oriental Motor Co. Ltd;
- Tem duas fases e é alimentado com 1A a 12V;
- Disponibiliza 22kgf.cm;
- Deslocam-se 1,8° por cada passo, ou seja, para uma volta completa o motor tem de dar 200 passos (ou 400 meios passos);

Este motor está acoplado a um redutor de engrenagem com uma relação 10:1, que por sua vez liga a um fuso com o passo de 5 mm.

Para o comando dos *MPP* foram utilizados os *drivers* que pertenciam ao sistema anteriormente implementado. Estes *drivers* são do fabricante *MIDDEX* e suporta tensões de alimentações até 40 Volt e uma corrente de 1,5 Ampere. Como a maioria dos *drivers* de *MPP* permitem:

- Meio passo/Passo completo;
- Ajuste da corrente máxima de alimentação;
- Inibição da entrada de corrente para o motor;
- Protecção em corrente e em tensão.

Existem quatro actuadores iguais dois a dois com as dimensões representadas na Fig. 60.



	Actuador 1	Actuador 2
A Comprimento	350 mm	964 mm
B Curso	145 mm	460 mm
C Diâmetro externo	96 mm	96 mm
Diâmetro interno	80 mm	80 mm

Fig. 60: Representação do Actuador

No *driver* foi seleccionada a opção de *Meio Passo* para uma melhor resolução e movimentos mais suaves.

No sentido de se determinar as características funcionais dos 'SAIC', estes foram testados em pressão e caudal.

#### 4.4.1 Análise da Pressão

Para se caracterizar o actuador fechou-se a sua saída e colocou-se um transdutor pressão, Fig. 61.



Fig. 61: Transdutor de Pressão

Foi induzida no *driver* do *MPP* uma frequência de 100 impulsos por segundo, fazendo aumentar a pressão, Fig. 62. Analisando o gráfico verifica-se que a pressão aumenta até cerca de 1450 kPa, sofrendo uma queda logo de seguida. A queda de pressão acontece porque o motor perde o seu sincronismo, levando a um ligeiro recuo e consequente libertação de pressão, logo depois disso o motor readquire o sincronismo.

O binário dos *MPP* diminui com o aumento de velocidade. De facto, ao analisar o gráfico da Fig. 62 verifica-se que a pressão máxima atingida pelo actuador varia inversamente com o aumento da velocidade do *MPP*. Desta forma, pode-se garantir, com alguma margem, que o sistema suporta pressões até 1200 kPa, desde que utilizemos velocidades inferiores a 100 impulsos por segundo.



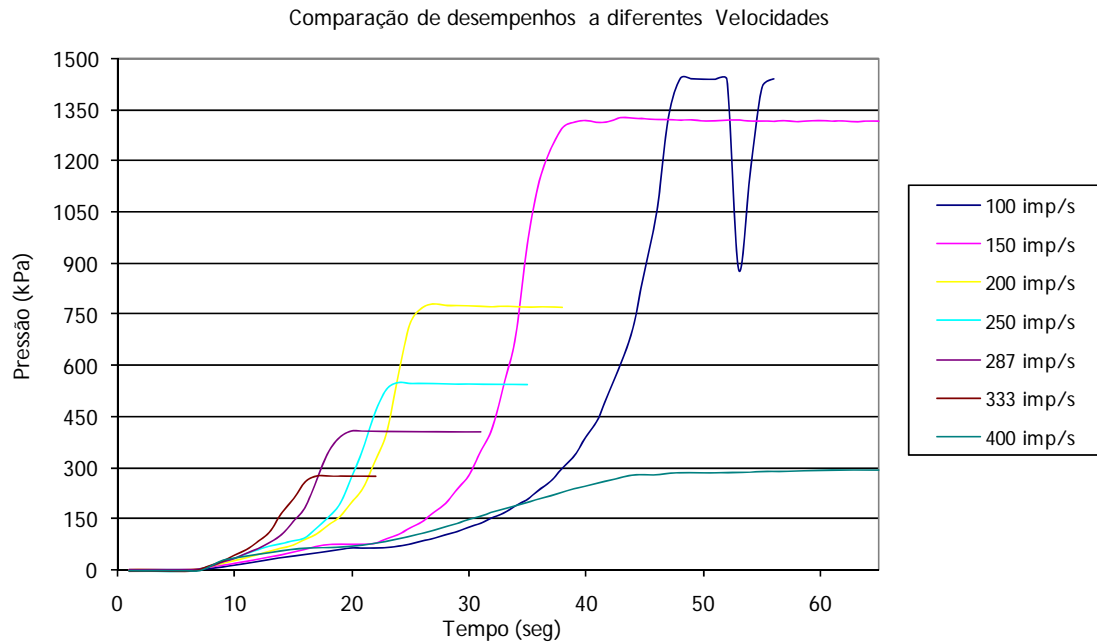


Fig. 62: Gráfico com a Evolução das Pressões a Diferentes Velocidades

Exceptuando o traçado de 400 impulsos por segundo, todos os outros apresentam um desenvolvimento semelhante, diferenciando-se pelo declive da subida da pressão e pela pressão máxima suportada. A esta velocidade, em que o declive deveria ser ainda mais acentuado isso não acontece porque o motor perde o seu sincronismo desde o início, ficando a rodar de forma incerta. Por esta razão esta velocidade nunca poderia ser usada num sistema de controlo tendo-se limitado a velocidade máxima a 350 impulsos por segundo.

Na Fig. 63 é apresentado um gráfico com a relação entre a pressão máxima e velocidade para os exemplos obtidos.

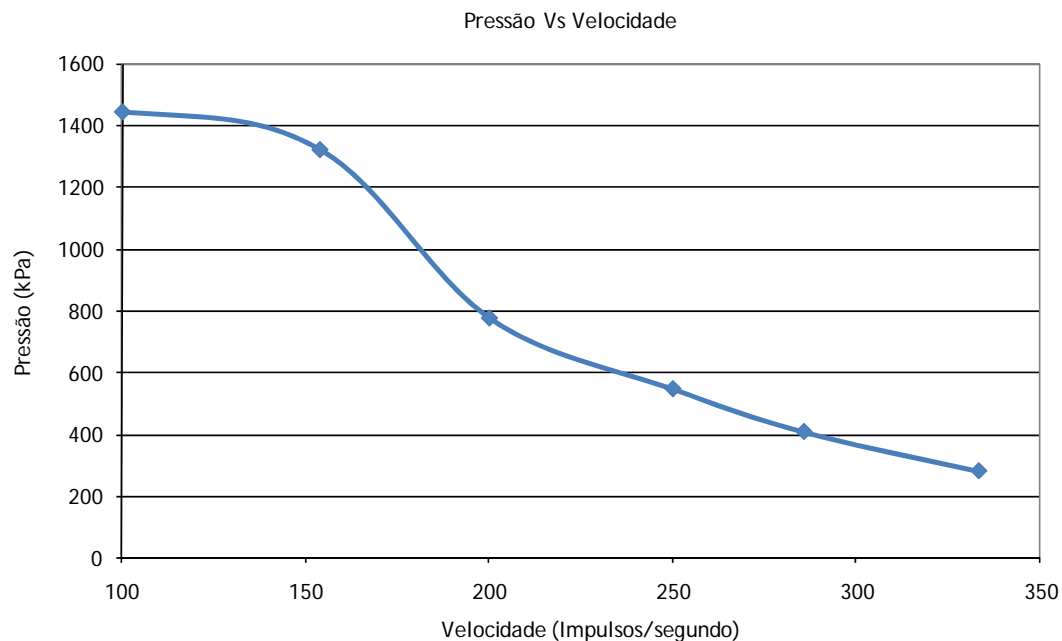


Fig. 63: Gráfico com a Relação entre a Pressão e a Velocidade

#### 4.4.2 Análise do Caudal

Para a análise de caudal foi utilizado o medidor de volume existente no *LabGeo* (Fig. 64) para se determinar o caudal a diferentes velocidades sempre com pressão nula à saída. Com estes dados foi determinada a relação entre o caudal e a velocidade do *MPP*.



Fig. 64: Medidor de volume

Considerando:

- $\Delta V$  a variação de volume;
- $\Delta t$  o intervalo de tempo;
- $V_{imp}$  a velocidade em impulsos por segundo;
- $k$  o volume transferido por cada impulso;

em que resulta

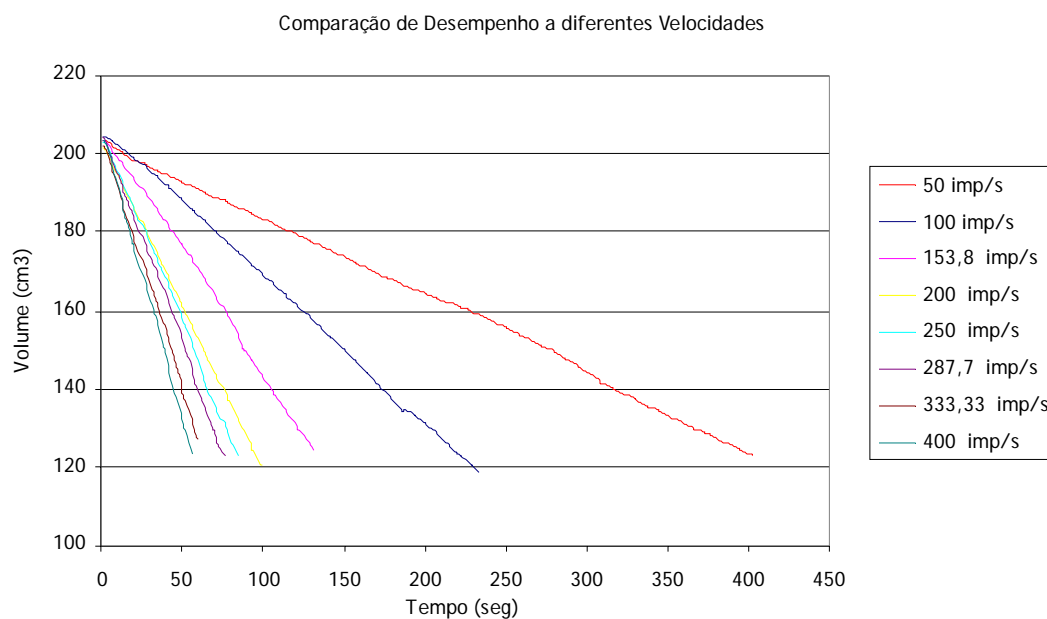
$$\text{Caudal} = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (4-13)$$

$$\text{Caudal} = k \times V_{imp} \quad (4-14)$$

E assim o volume transferido num dado intervalo de tempo é:

$$\text{Volume} = k \times V_{imp} \times \Delta t \quad (4-15)$$

O gráfico da *Fig. 65* apresenta a evolução temporal do volume obtido para diferentes velocidades.



*Fig. 65: Variação de Volume a Diferentes Velocidades*

Com estes dados determinou-se a constante  $k$  da equação (4-15) , ou seja, por cada impulso fornecido ao motor este move  $3,937 \text{ mm}^3$  de água, a  $0 \text{ kPa}$  de pressão.

## 4.5 Projecto do Controlador

Antes do desenvolvimento da aplicação final, e após o hardware de comando dos actuadores ter sido montado, foi estudado o método de controlo que deveria ser utilizado no sistema.

Este controlo incidiu principalmente sobre os actuadores 'SA/C' pois a ideia inicial deste trabalho era utilizar unicamente estes dispositivos. Como foi dito atrás, o comando destes actuadores é efectuado pela rotação dos *MPP's*, ou seja, a variável de entrada é a velocidade de rotação destes motores e a variável a controlar é a pressão, a força, ou o deslocamento.

Como foi dito anteriormente, os ensaios triaxiais são em geral bastante demorados, começando com pressões baixas e atingindo no fim pressões elevadas. Dado o comportamento do sistema, um passo no início do ensaio leva a pequenas alterações na pressão, enquanto que a pressões mais elevadas a mesma rotação na entrada leva a grandes alterações na pressão de saída.

Para controlar o sistema foi usado um controlador do tipo *PID*. Estes controladores têm três componentes de acção de controlo que são descritas na *Tabela 5*.

*Tabela 5: Características gerais dos controladores do tipo PID*

<b>Acção de controlo</b>	<b>Tempo de subida</b>	<b>Overshoot</b>	<b>Tempo de estabelecimento</b>	<b>Erro em regime estacionário</b>
Proporcional	Diminui	Aumento	Não altera	Diminui
Integral	Diminui	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativa	Não altera	Diminui	Diminui	Não altera

Como as variáveis a controlar têm um desenvolvimento lento, optou-se por um único controlador cujas constantes são alteradas em função do tipo de variável a controlar. Entre as três variáveis acima referidas, a mais simples de controlar é a pressão, já que no controlo de força e de deslocamento são

usados dois actuadores. Entre estas duas variáveis a utilizada para a sintonização do controlador foi a força, já que na fase de testes não é possível testar o deslocamento sem estar a câmara totalmente montada com uma amostra de solo.

Durante o dimensionamento do controlador foi utilizado um actuador pneumático com um diâmetro de  $63\text{ mm}$  (*Fig. 66*) existente no *LabGeo*, dado que o actuador adquirido veio posteriormente. Embora as características dos actuadores sejam diferentes, o adquirido e realmente instalado tem características melhores para o controlo, sendo a sua secção é maior o que implica um deslocamento do êmbolo mais lento, pouco relevante para este tipo de ensaios, uma vez que não existe grandes requisitos temporais.



*Fig. 66: Actuador Pneumático*

#### **4.5.1 Caracterização do Sistema**

No gráfico da *Fig. 67* está representada uma resposta do sistema em força e pressão relativamente ao tempo com velocidade constante ( $100$  impulsos por segundo).

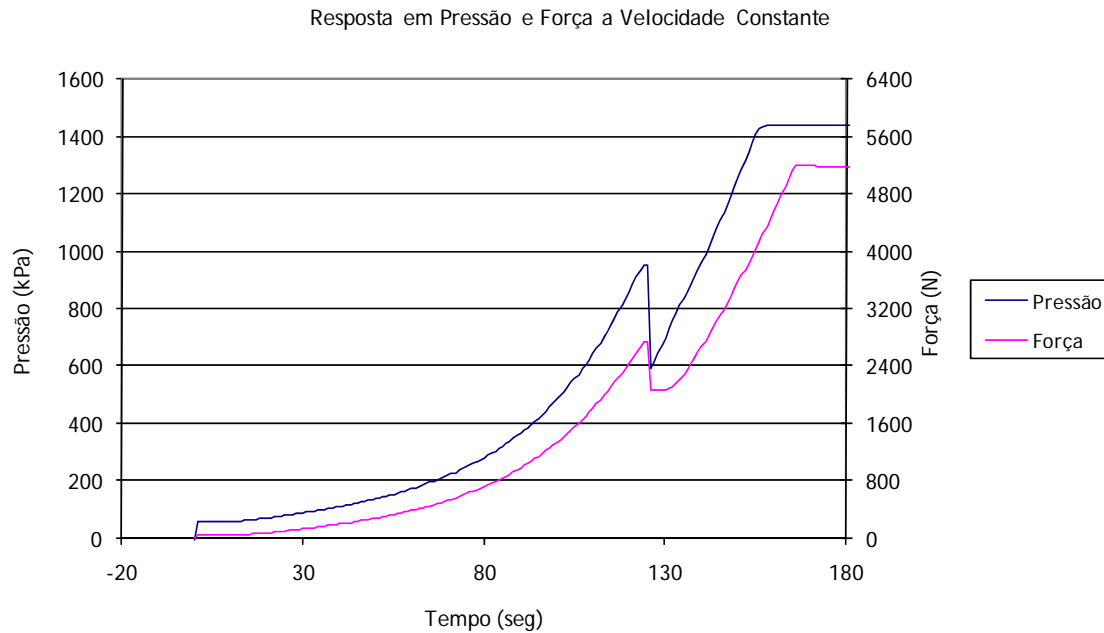


Fig. 67: Gráfico de Pressão e de Força

O gráfico tem um comportamento aproximadamente exponencial, sendo a evolução lenta (dinâmica reduzida) até aos 60 segundos (200 kPa). A perturbação que ocorre à volta dos 120 segundos deve-se a não linearidades acentuadas existentes no sistema, resultantes de um reajuste mecânico das partes constituintes do actuador e atritos que se façam sentir durante o movimento. Esta descontinuidade ocorre em todos os testes à volta da mesma posição.

No gráfico da Fig. 68 está representado o traçado da força em função da pressão. Este gráfico foi obtido aumentando a pressão até ao máximo voltando depois à situação inicial. Como pode ser visualizado, além do que acontece à volta dos 120 segundos o sistema apresenta também uma histerese considerável.

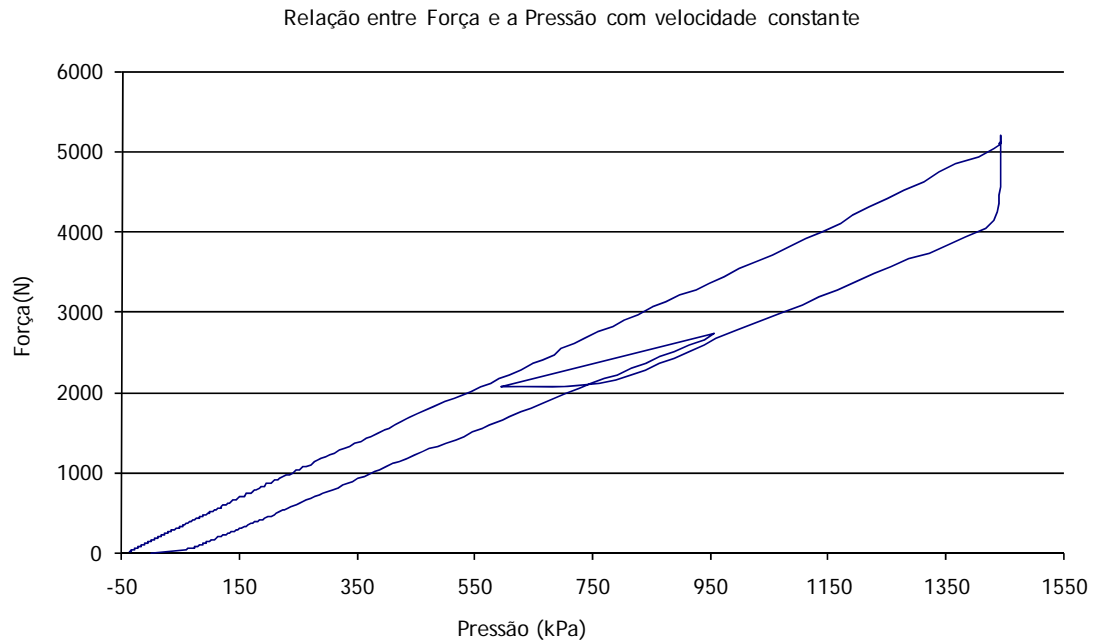


Fig. 68: Gráfico com a relação entre a Força e a Pressão

Pelos dados representados em todos os gráficos de força e pressão, observa-se que o sistema é inicialmente muito lento, sendo necessário um maior movimento de rotação para alterar significativamente a saída. Contrariamente, para pressões elevadas uma pequena rotação do motor facilmente se faz sentir na saída.

Para dimensionar um bom controlador seria útil possuir o conhecimento detalhado do comportamento do sistema, no entanto devido ao desconhecimento de diversos parâmetros isso não foi possível. Contudo, este facto deixa de ser relevante devido à reduzida dinâmica necessária para o sistema, o que simplifica largamente o controlador.

O primeiro mecanismo de controlo desenvolvido foi um compensador para o comportamento exponencial acentuado do sistema. Este compensador poderia ser a exponencial inversa à obtida do sistema, contudo foi utilizada uma exponencial compensatória mais simples. No gráfico da Fig. 69 está representado dois traçados correspondentes a uma aproximação do sistema e ao possível compensador. O traçado  $b-e(x)$  providencia uma compensação à dinâmica do sistema.



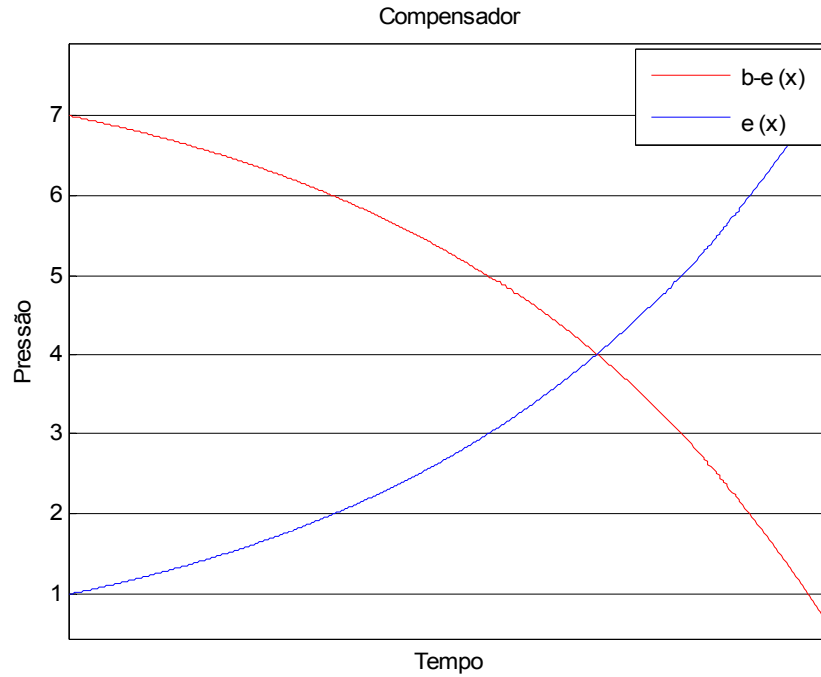


Fig. 69: Esboço do Compensador

De uma forma geral esse compensador teria o aspecto da seguinte equação:

$$K_{Adap} = b - e^{a \cdot x} \quad (4-16)$$

em que  $K_{Adap}$  é o valor de saída do compensador. Os valores de  $a$  e  $b$  irão variar com os parâmetros do sistema.

Assumindo que se tem dois pontos conhecidos do compensador, facilmente se obtém os valores desconhecidos. Esses valores estariam relacionados com os máximos e mínimos admissíveis para o valor de  $K_{adap}$ , em que o valor máximo corresponde ao estado inicial ( $0 \text{ kPa}$  ou  $0 \text{ N}$ ) e o valor mínimo quando o sistema se encontra na saída máxima previsível.

Estipulando  $K_{Max}$  como o valor máximo quando a pressão (ou força) é zero e  $K_{Min}$  quando o sistema atinge o seu máximo, obtêm-se os valores de  $a$  e  $b$ .

$$(x, K_{Adap}) \rightarrow (0, K_{Max}) \quad (4-17)$$

$$K_{Max} = b - e^{a \cdot 0} \Leftrightarrow b = K_{Max} + 1 \quad (4-18)$$

$$(x, K_{Adap}) \rightarrow (MaxValue, K_{Min}) \quad (4-19)$$

$$K_{Min} = K_{Max} + 1 - e^{a \cdot MaxValue} \Leftrightarrow a = \ln \left( \frac{K_{Max} - K_{Min} + 1}{MaxValue} \right) \quad (4-20)$$

A fórmula que permite obter o valor de  $K_{adap}$ , é uma função exponencial:

$$K_{Adap} = K_{Max} + 1 - e^{\left( \ln(K_{Max} - K_{Min} + 1) \cdot \frac{x}{MaxValue} \right)} \quad (4-21)$$

em que  $x$  é o valor actual da variável a controlar.

Para este caso o  $MaxValue$  será de 5000. Para o  $K_{min}$  e  $K_{max}$  foram adoptados os valores de 1 e 4 respectivamente. Isto significa que a saída do controlador, quando a força é 5000 N, não se altera, pelo contrário quando a força é 0 N assume o seu quádruplo, permitindo assim contrapor um pouco o efeito da resposta do sistema.

Também foram estudados outras aproximações além da função exponencial, apresentadas de seguida, mas não se forneceram respostas tão boas.

- Linear:

$$K_{Adap} = K_{Max} - \frac{K_{Max} - K_{Min}}{MaxValue} \cdot x \quad (4-22)$$

- Logarítmico:

$$K_{Adap} = K_{Max} - \log \left( \frac{x \cdot 10^{K_{Max} - K_{Min}}}{MaxValue} + 1 \right) \quad (4-23)$$

Após o dimensionamento do compensador foram definidas os requisitos para o controlador, em particular, o erro máximo de pressão (2kPa).

Como o diâmetro das amostras de solo é variável, considerou-se o caso mais crítico, ou seja, o mais reduzido, que é de 38 mm. Assim o erro de força axial resultante é de 2,27 N.

O controlador usado tem uma arquitectura semelhante aos tradicionais *PID*, constituídos por três componentes, a proporcional, a integral e a derivativa.

Fazendo uma análise da implicação de cada componente na resposta do sistema pode-se escolher uma tipologia do controlador a utilizar.

- Tempo de Subida tem uma importância reduzida já que o sistema é lento e os requisitos dinâmicos para os ensaios também não são exigentes;
- Overshoot é um factor importante devendo ser nulo, assim os provetes nunca teriam uma carga superior à desejada;
- Tempo de estabelecimento também não tem uma importância relevante;
- Erro em regime estacionário deverá ser nulo.

Este último factor pode levar à escolha de um *PD* ou então de um *PID*. Contudo, em regime permanente, quando o erro é nulo, a entrada do sistema deverá ser também nula.

Neste caso, com um controlador do tipo *P* o sistema iria tender para o valor de *setpoint* e oscilar em torno dele. De modo a reduzir as variações foi acrescentado um ganho derivativo ao controlador, ficando assim um controlador do tipo *PD*. Desta forma, a expressão de saída do controlador seria a seguinte:

$$Vel_{Out} = K_P \cdot Error + K_D \cdot \Delta Error \quad (4-24)$$

com:

$$Error = SetPoint_{Actual} - ValorReal_{Actual} \quad (4-25)$$

$$\Delta Error = \frac{Error_{Actual} - Error_{Anterior}}{\Delta t} \quad (4-26)$$

Existem hoje vários métodos de sintonização de controladores *PID*, contudo os mais comuns são utilizados para controladores do tipo *P*, *PI* e *PID*; para o tipo *PD* não é normal encontrar diversos métodos de sintonização.

O método que irá ser utilizado para a sintonização dos parâmetros do controlador foi desenvolvido por *Ziegler* e *Nichols* ([http://en.wikipedia.org/wiki/PID\\_controller](http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller)) e funcionará como ajuste manual

dos ganhos proporcional e derivativo. A componente proporcional é a que fará o sistema atingir o estado desejado e posiciona-lo em torno deste ponto com uma oscilação. Para reduzir essas oscilações é introduzido o ganho derivativo.

Para determinação do valor de  $K_p$  aumenta-se o seu ganho e, simultaneamente, analisa-se a resposta do sistema. Quando o sistema possuir um ganho crítico, ou seja, uma resposta com um comportamento oscilatório permanente, o valor de  $K_p$  a assumir deverá ser metade desse valor crítico.

Utilizando o  $K_p$  calculado, faz-se aumentar o valor do  $K_d$  até que o sistema tenha a resposta desejada. Achando-se necessário o valor de  $K_p$  e  $K_d$  podem sofrer alguns ajuste para uma melhor resposta do sistema.

#### **4.5.2 Resposta do Sistema**

Neste tipo de ensaios os actuadores deverão ser capazes de seguir um dado perfil de força ou pressão.

##### **4.5.2.1 Sintonização do Controlador**

Numa primeira fase, a sintonização do controlador será analisada face às respostas do sistema para  $100\text{ N}$  e  $4500\text{ N}$  já que são duas situações díspares. Fazendo variar o  $K_p$  entre 1 e 50, verifica-se que para uma força de  $100\text{ N}$  a influência, em regime estacionário, é muito reduzida. Para  $4500\text{ N}$ , já não se verifica a mesma situação, com  $K_p$  a assumir o valor de 50 o sistema não estabiliza, com  $K_p$  igual a 1 o sistema é um pouco lento. Verifica-se que com o valor igual a 5 o erro é reduzido e comporta-se bem em ambas as situações. (Ver Fig. 70)

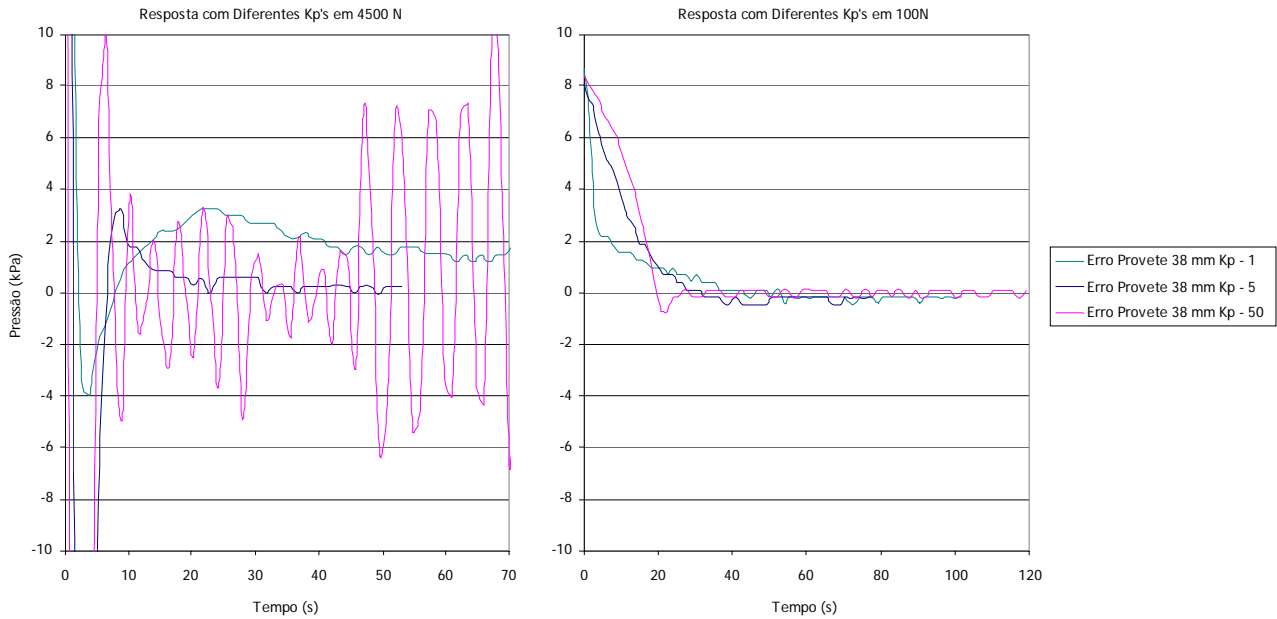


Fig. 70: Resposta do Sistema a Diferentes Valores de  $K_P$

Após vários testes com diferentes valores de  $K_P$  e  $K_D$  cujos resultados foram insatisfatórios, adicionou-se uma compensação linear ao valor de  $K_P$ . De forma similar à analisada anteriormente para o compensador da entrada, o valor de  $K_P$  será calculado através da função linear:

$$K_P = K_{P_{Max}} - \frac{K_{P_{Max}} - K_{P_{Min}}}{MaxValue} \cdot \chi \quad (4-27)$$

O controlador final deveria ser capaz de controlar o sistema em força e também pressão, o que à partida não seria complicado já que, teoricamente, a força disponibilizada pelo actuador seria proporcional à pressão aplicada. Na prática tal não acontece devido a não linearidades existentes, principalmente a forças de atrito e os pesos dos componentes mecânicos acoplados ao êmbolo do actuador.

O valor encontrado para  $K_D$  foi de 0,5 e para  $K_P$  entre 0,5 e 3. Para estes valores obteve-se os gráficos da Fig. 71 (pressão) e da Fig. 72 (força), confirmando-se que o erro se mantém dentro dos limites definidos anteriormente.

Conforme se esperava, estas respostas melhoraram ainda com o uso do novo actuador pneumático.

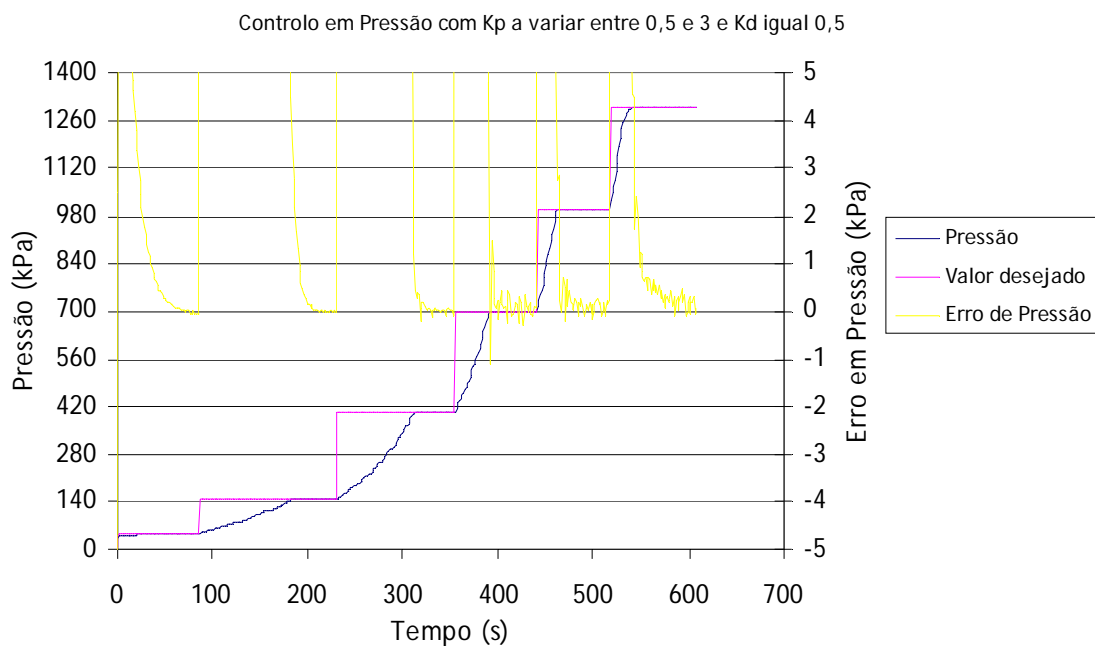


Fig. 71: Resposta em Pressão com Controlador

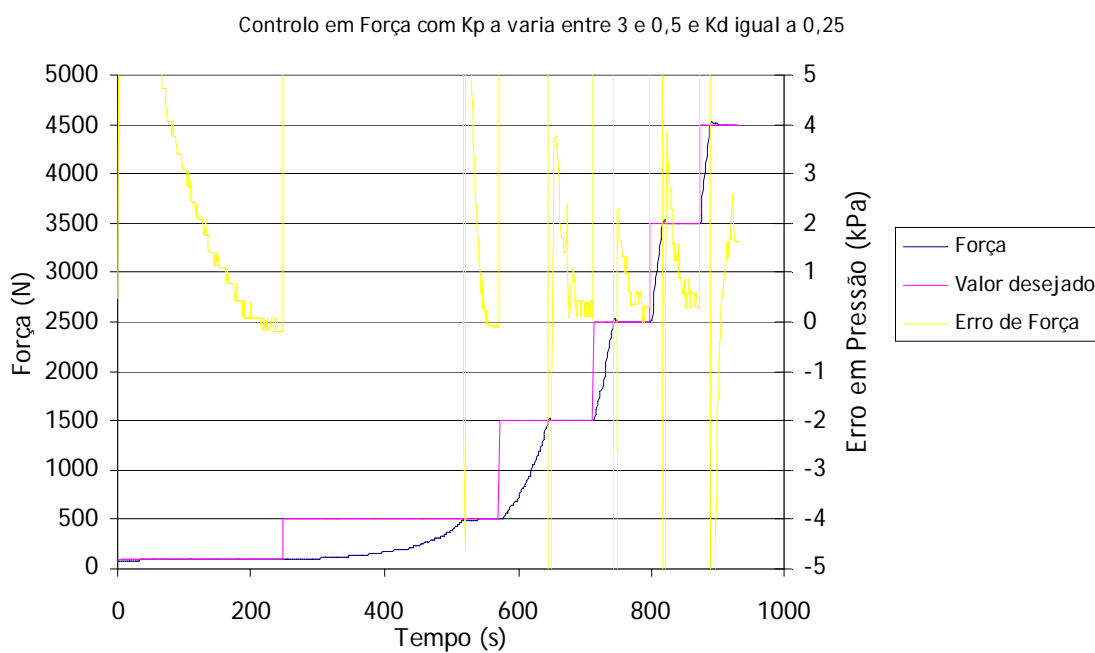


Fig. 72: Resposta em Força com Controlador

## 4.5.2.2 Modelo Final do Sistema

Na Fig. 73 está representado um diagrama de blocos do sistema. Em amarelo encontram-se os parâmetros do sistema e do mesmo lado, a verde, encontra-se o *Max\_Value*, que no caso do controlo em força é 5000 (N). A azul está representado o *Setpoint*, que normalmente tem um dado perfil definido pelo utilizador. Do lado direito, a laranja, está representada a planta a controlar.

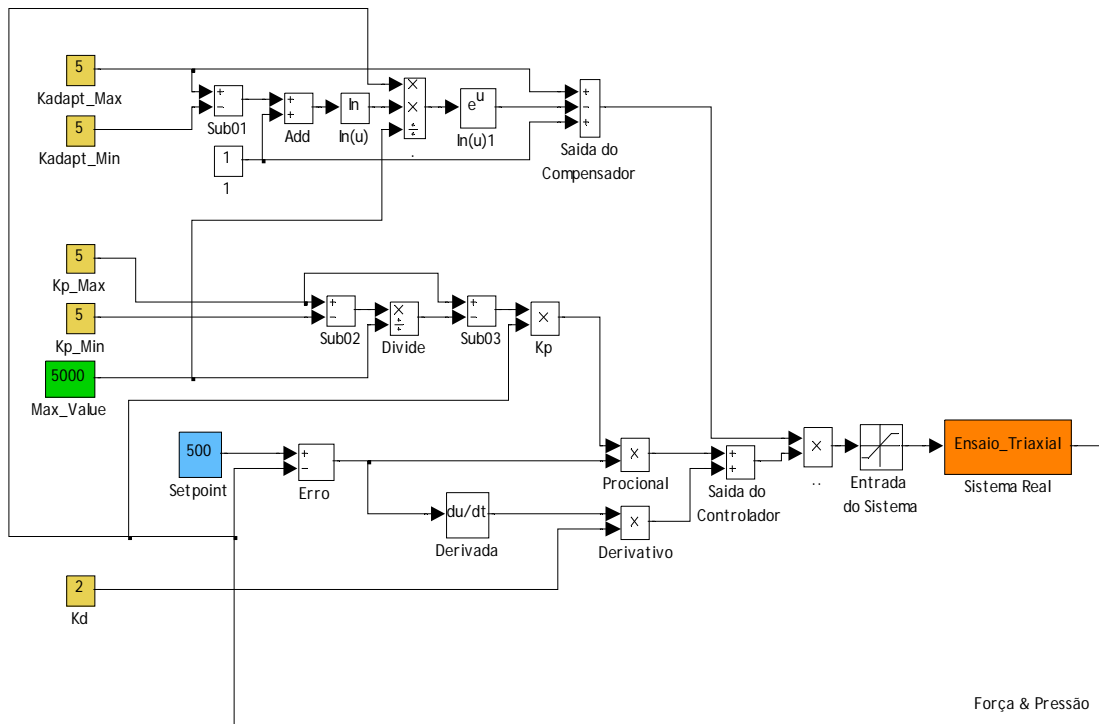


Fig. 73: Modelo do Sistema

#### 4.6 Resultados obtidos

Com o sistema desenvolvido realizou-se pela primeira vez no *LabGeo* ensaios triaxiais clássicos com sucção controlada. A diferença destes ensaios para os mais comuns é a presença de uma pressão de ar aplicada na parte superior da amostra, dificultando o controlo do ensaio. Isto acontece devido ao facto do ar ser compressível levando a uma maior variação de volume durante o ensaio.

Na *Tabela 6* é apresentado as diferentes fases de um ensaio realizado com o sistema desenvolvido.

*Tabela 6: Ensaio Triaxial ilustrativo*

<b>Fase</b>	<b><math>u_a</math></b> (kPa)	<b>Back</b> (kPa)	<b>Cell</b> (kPa)	<b>q</b> (kPa)	<b>Nota</b>
1 – Percolação	-	20	30	-	Até pingar
2 – Imposição inicial da pressão de ar	20	20	40	-	½ h
3 – Imposição da condição não saturada	30	20	50	0	½ h (evolução) + ½ h (repouso)
4 – Ajuste para a linha $K_0$	30	20	50	13	½ h
5 – Imposição das tensões iniciais	45	20	165	80	3 h
6 – Equilíbrio das pressões internas do provete	45	20	165	80	Até não haver variação de volume
7 – Corte	45	20	165	-	Deformação = 0,3 mm/h

Observando as condições do ensaio, existem duas variáveis de controlo que permaneceram constantes durante muito tempo, a  $u_a$  (pressão ar) e a *back* (pressão neutra). Para o ajuste da pressão de ar foi utilizado um regulador de pressão de ar, para a *back* foi utilizado um equipamento que possibilita um controlo da pressão de água através da pressão de ar, *Fig. 74*.



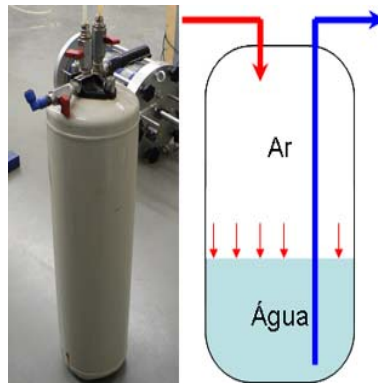


Fig. 74: Esquema de Funcionamento do interface ar-água

Quando se adiciona água ao depósito e se aplica uma pressão de ar pela parte superior, a água é pressionada para baixo e expelida através de um tubo ligado desde a parte inferior até à saída.

Este sistema foi usado também para manter a pressão na câmara durante a primeira fase, a percolação. Nesta fase, procedeu-se à saturação do provete, inserindo água que se espalha pelo seu interior, expulsando o ar existente entre os grãos do solo. Foi também nesta fase que a membrana envolvente da amostra se ajustou ao solo, fazendo com que a variação de volume na câmara fosse considerável.

Na segunda fase aumentou-se a pressão na câmara usando o sistema de controlo desenvolvido e aumentou-se manual a pressão de ar. Depois de terminada esta fase, iniciou-se a terceira (semelhante à segunda) e manteve-se as entradas do sistema constantes durante meia hora. A quarta fase levou ao aumento da variável  $q$  (que varia com carga axial imposta ao provete). Na quinta fase aumentou-se a pressão na câmara, o  $q$  e a pressão ar da mesma forma que na outras fases.

O sistema permanecerá com as condições da sexta fase até a variação de volume ser desprezável, sinal de que atingido o equilíbrio interno das pressões de água e ar. Depois disso inicia-se a parte mais importante do ensaio que é o corte, aplicando uma força axial que resulta do movimento controlado do êmbolo sobre provete.

Na Fig. 75 é apresentado um gráfico com o traçado das pressões do ensaio completo.

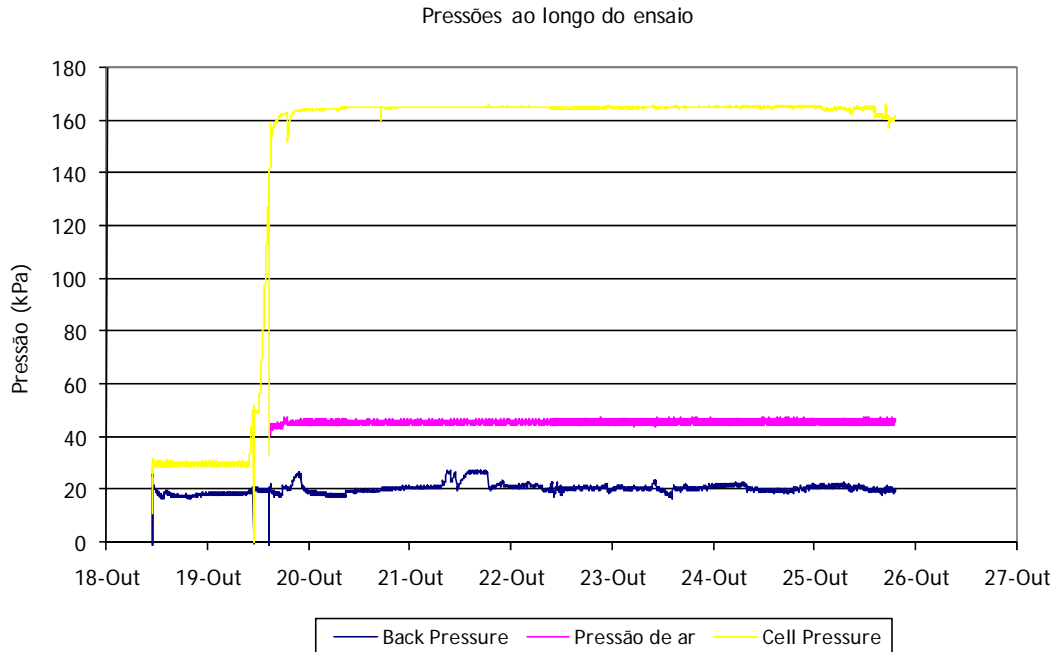


Fig. 75: Gráfico com a Evolução das Pressões ao longo de um ensaio

Pelo gráfico anterior podem ser tiradas algumas conclusões acerca do comportamento do sistema. Desde logo, salienta-se a duração do ensaio, neste caso, seis dias.

Dos três traçados anteriores o que apresenta menor variação é o da pressão na câmara (*Cell Pressure*). Após a fase inicial em que são aumentadas as pressões até à pressão necessária para se iniciar o corte, a pressão estabiliza nos  $165 \text{ kPa}$  e mantém esse valor à medida que o provete vai sendo comprimido axialmente.

As pressões de água no interior (*back*) e de ar apresentam maiores variações durante o ensaio já que são aplicadas no sistema através de reguladores de ar, em que a pressão a jusante varia com a pressão a montante (que tem fortes variações).

A fase do ensaio que requer mais atenção é a do corte, em que é necessário o controlo da pressão da câmara e também da deformação axial. Em alguns casos, durante o corte fazem-se reduz-se a força axial no solo (descarga). Estas descargas definidas pelo utilizador na aplicação, fazem reduzir a força controladamente até um dado patamar reiniciando-se novamente o controlo por deformação, Fig. 76. Pela figura verifica-se que a deformação tem o declive pretendido e um comportamento muito linear. Ao ser

iniciada a descarga, o sistema passa a ser comandado em força, diminuindo esta linearmente até se atingir um limite pré-estabelecido, depois desse valor o sistema reinicia o controlo por deformação.

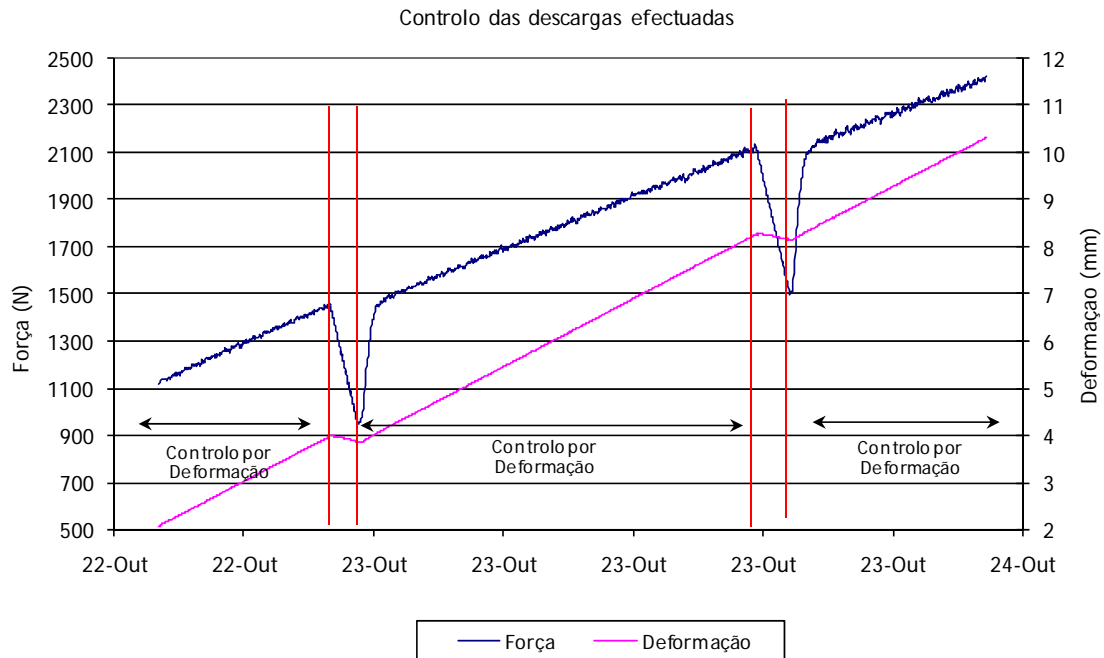


Fig. 76: Gráfico com o Traçado de Descargas Efectuadas Durante Um Ensaio

Do ponto de vista da engenharia civil interessa essencialmente a relação entre a deformação e carga exercida no provete, que é representado no gráfico da Fig. 77. Simplificadamente tem-se:

- Valor de carga máxima:
  - Permite definir resistências.
- Relação entre força e deslocamento:
  - Define a rigidez da amostra, que permite estimar as deformações de obras reais.

Pelo gráfico as duas descargas estão representadas nos 4mm e nos 8 mm. Salienta-se que para uma descarga ser bem efectuada, esta deve apresentar um segmento o mais recto possível e com um certo declive. Como pode ser observado, os resultados obtidos são bastante bons com as descargas a terem um comportamento de acordo com o desejado.

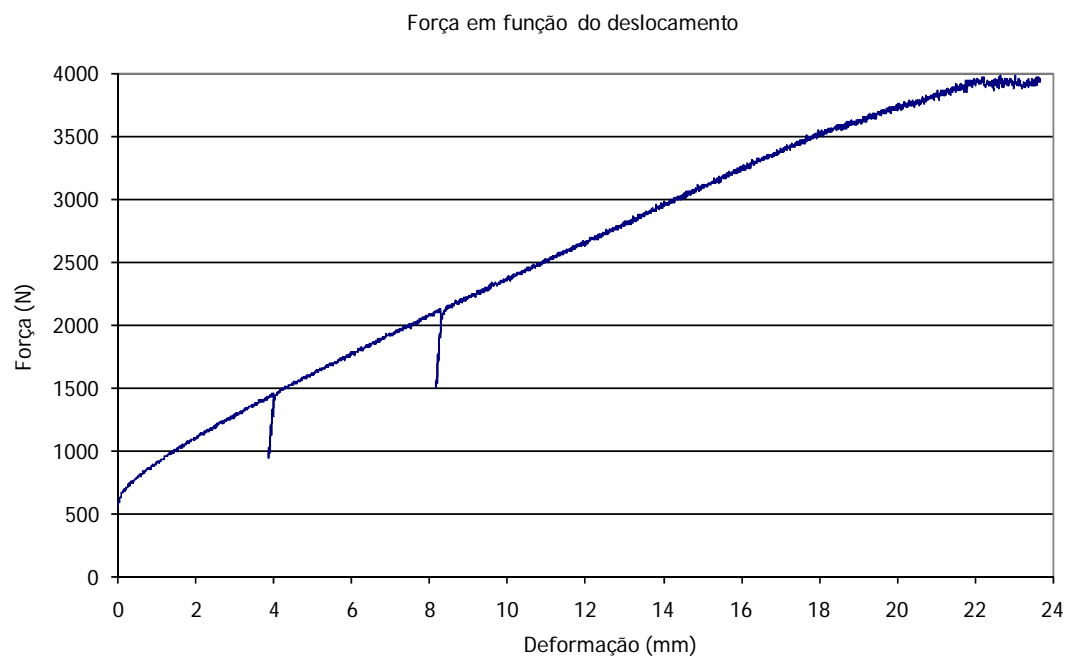


Fig. 77: Gráfico da Força em função do Deslocamento

## 5 Conclusão

Este trabalho surgiu da necessidade de dotar o *LabGeo* (*Laboratório de Geotecnia, FEUP*) de dois sistemas de ensaios triaxiais de solos desenvolvido à medida: um para a realização de ensaios triaxiais verdadeiros e o outro para os ensaios triaxiais clássicos.

O sistema para controlo e monitorização de ensaios triaxiais verdadeiros é novo no momento e único no *LabGeo*. Também não são conhecidos sistemas comerciais automáticos deste tipo. Nestes ensaios são utilizadas câmaras com um formato cúbico, onde são inseridas as amostras de solo. A pressão é aplicada à amostra, de uma forma independente nos três eixos, através da injeção de água sob pressão nas faces correspondentes da câmara triaxial cúbica.

No início deste trabalho definiu-se como objectivo a concepção de uma aplicação para controlo e monitorização destes ensaios utilizando os actuadores do fabricante *GDS*. A aplicação desenvolvida implementa com sucesso o controlo de pressão, volume e deformação de três eixos em simultâneo de uma forma síncrona.

A segunda fase do trabalho contemplou o desenvolvimento de uma plataforma de controlo e monitorização de ensaios triaxiais clássicos. Nestes ensaios a amostra é colocada no centro de uma câmara cilíndrica, ficando sujeita a pressões controladas pela periferia (de confinamento, *cell*), pelo interior (*back*) e segundo o eixo axial (*Ram e/ou Load*) através de fluxo de água introduzida em cada uma das câmaras.

No sentido de reduzir custos, optou-se por reutilizar a parte mecânica de um sistema antigo, cujo funcionamento já não cumpria as exigências actuais. Desta forma foram reutilizados os actuadores (4) e os respectivos *drivers*, tendo-se desenvolvido de raiz o *software*, as interfaces de condicionamento de sinal e uma placa de controlo baseada num microcontrolador.

Ambas as aplicações foram desenvolvidas utilizando o LabVIEW 7.1 ([www.ni.com](http://www.ni.com)) de modo a permitir a sua fácil actualização e integração com outros módulos. Os sistemas foram já testados com sucesso em condições reais de operação, tendo servido de plataforma de ensaios para dois

doutorandos de Engenharia Civil no *LabGeo*.

Os sistemas desenvolvidos são uma grande mais-valia para o *LabGeo* pois, ao contrário do habitual, são plataformas abertas e flexíveis permitindo a sua fácil adaptação e parametrização. Nomeadamente, o sistema desenvolvido para os ensaios triaxiais clássicos, pode ser ligado a três tipos de actuadores (*GDS*, '*SAIC*' e '*IC*') e a duas prensas de fabricantes diferentes (*ELE International* e *Wykeham Farrance*). Dado que estes ensaios são muito longos, em geral de vários dias até algumas semanas, o sistema foi dotado da capacidade de publicação dos dados on-line em tempo real através de um servidor Web próprio. Para além dos dados, um utilizador remoto, pode ainda aceder a uma câmara IP da Linksys com possibilidade de posicionamento (Pan, Tilt e Zoom) para acompanhar o ensaio.

Dado o seu inegável interesse para apoio à investigação nesta área do saber, tendo-se a intenção de registar e comercializar desta aplicação.

Neste trabalho, de dissertação do Mestrado em Automação, Instrumentação e Controlo, distinguem-se claramente os conteúdos do curso, estando presentes as três áreas referidas. Este tipo de trabalho é muito motivador para o aluno, pelo seu interesse real e aplicabilidade imediata. Acresce que vem mais uma vez reforçar a ideia de que as parcerias interdepartamentais são desejáveis permitindo uma redução de custos e desenvolvimentos à medida das necessidades.

## **5.1      *Desenvolvimentos futuros***

No futuro espera-se continuar o desenvolvimento destes sistemas, incorporando novas funcionalidades que os utilizadores venham a requer e validar a aplicação com os restantes actuadores. Para reforçar a segurança durante o ensaio, está prevista ainda a ligação a um modem GSM/GPRS para o envio automático de mensagens de alarme. Espera-se ainda fazer uma actualização do *hardware* para tornar o sistema comercializável.

A integração deste sistema numa plataforma de ensino à distância, que inclua informação detalhada sobre os ensaios, bibliografia, simuladores virtuais e o acesso ao sistema real é também uma possibilidade.

## 6 Bibliografia

- [1] Freitas, F.; Chouzal, M.; Carvalho, F.; Sampaio, J.; Ribeiro, M.. (1991) *Automatização de Sistema de Ensaio Triaxial de Solos – ENDIEL 91.*
- [2] Viana da Fonseca, A.; Freitas, F.; Chouzal, M.; Carvalho, F.; Sampaio, J.; Ribeiro, M..(1991). *Um Sistema de Controlo Automático para Ensaaios Triaxiais com Trajectórias Independentes de Tensões (Stress Path).*
- [3] DEMEC – FEUP. (1989). *Máquina de Ensaios de Solos - Sistema de Accionamento*
- [4] Topa Gomes, António; Viana da Fonseca, António; Costa, Carlos; Gabriel, Joaquim. (2008) *Desenvolvimento de um equipamento para realização de ensaios triaxiais em condições não saturadas.* Artigo aceite para o congresso Luso-Brasileiro a realizar em Abril de 2008 em Coimbra.
- [5] Costa, Carlos; Ferreira, Cristiana; Viana da Fonseca, António; Mendes, Joaquim. (2008) *Ensaaios Triaxiais Verdadeiros em Provetes de Solo Residual de Granito do Porto: Concepção e implementação do sistema de aquisição e controlo automático.* Artigo aceite para o congresso Luso-Brasileiro a realizar em Abril de 2008 em Coimbra.
- [6] Datascan 7000 Series. *Datascan Installation & User Guide*
- [7] Datascan 7000 Series. *Datascan Driver Implementation, Software Utilities*
- [8] MIDDEX Electronic. *Bipolar Chopper Driver, 200/400 Digital Phase Current adjustment*
- [9] GDS Instruments, *The GDS Standard Pressure/Volume Controller (STDDPC)*
- [10] Geotechnical Systems Group, School Of Engineering, University of Durham. (2002) *TRIAX Version 4.2.*
- [11] National Instruments, *NI PCI 6221 Datasheet*
- [12] ELE International. *Operation Instructions – Digital Tritest 50, Digital Tritest 100*
- [13] Wykeham Farrance International. *WFI10056 TRITECH 50 – Digital Triaxial Load Frame of 50 kN capacity*
- [14] Viana-da-Fonseca, A. J. P. (1996). *Geomecânica dos Solos Residuais do Granito do Porto. Critérios para dimensionamento de fundações directas.* Departamento de Engenharia Civil. Porto, Universidade do Porto
- [15] Wikipedia. *Wikimedia Foundations – <http://pt.wikipedia.org/>*

## Anexos

### Anexo.1 Formulas Ensaio Triaxiais Clássicos

Tabela 7: Variáveis dos Ensaio Triaxiais

Parâmetro	Abreviatura	Unidade	Equação
Área inicial	A0	mm <sup>2</sup>	$A0 = \pi \times \frac{D0}{4}$
Volume inicial	V0	mm <sup>3</sup>	$V0 = A0 \times H0$
Volume presente	volume	mm <sup>3</sup>	$Volume = V0 - VolumeGauge \times 1000$
Extensão volumétrica	vstrain	%	$Vstrain = \frac{(V0 - Volume)}{V0} \times 100$
Altura presente	height	mm	$Height = H0 - displacement$
Extensão axial	astrain	%	$astrain = \frac{(H0 - height)}{H0} \times 100$
Área presente	area	mm <sup>2</sup>	$area = A0 \cdot \frac{(1 - Vstrain)}{100} \cdot \frac{(1 - astrain)}{100}$
Extensão Radial	rstrain	%	$rstrain = \frac{D0 - diameter}{D0} \times 100$
Pressão Neutra	u	kPa	<i>pore</i>
Pressão efectiva	cell'	kPa	$cell' = cell - u$
Deviator Stress	q	kPa	$q = \frac{load \times 1000}{area}$
Tensão vertical	sigV	kPa	$sigV = q + cell$
Tensão vertical efectiva	sigV'	kPa	$sigvV' = sigV - u = q + cell - u$



Tensão horizontal	sigH	kPa	$sigH = cell$
Tensão horizontal efectiva	sigH'	kPa	$sigH' = sigH - u = cell - u$
'Total major principal Stress'	sig1	kPa	$sig1 = sigV = q + cell$
'Total major principal Stress' efectiva	sig1'	kPa	$sig1 = sigV' = q + cell - u$
'Total minor principal Stress'	sig3	kPa	$sig3 = sigH = cell$
'Effective Total minor principal Stress'	sig3'	kPa	$sig3' = sigH' = cell - u$
Effective Stress ratio	K	-	$K = sigH' / sigV'$
Mean Stress	p	kPa	$p = (sigV + 2 \cdot sigH) / 3$
Effective Mean Stress	p'	kPa	$p' = p - u$
'Mean Deviator Stress'	t	kPa	$t = q / 2$
Mean Stress	s	kPa	$s = (sigV - sigH) / 2$
Effective Mean Stress	s'	kPa	$s' = s - u$
Void Ratio	e	-	$e = \frac{volume \cdot Gs / Md}{1000} - 1$
Water Content	w	%	$w = \frac{Mw - Md - VolumeGauge}{Md} \times 100$

## Anexo.2 Circuitos Electrónicos das Placas Desenvolvidas

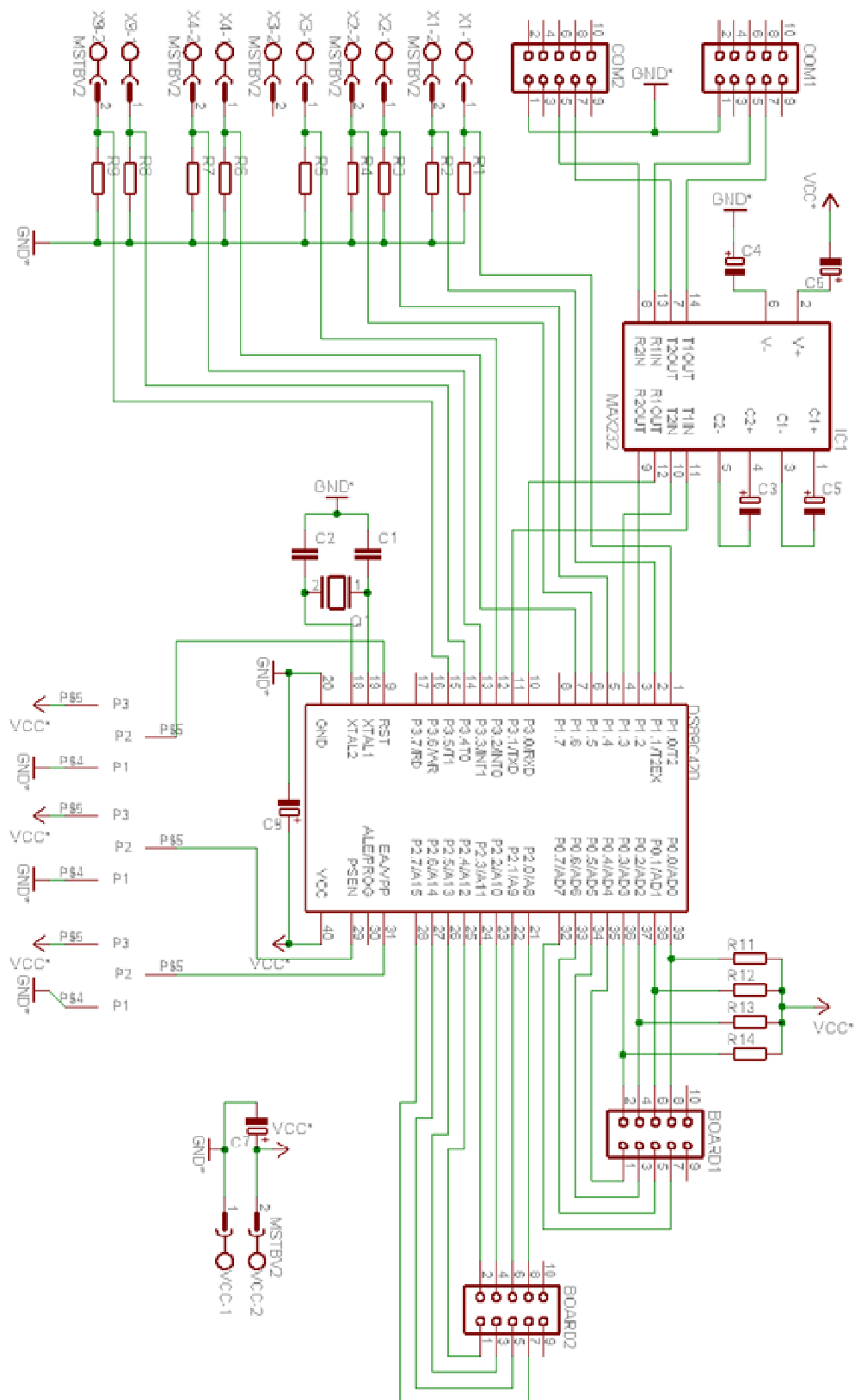


Fig. 78: Circuito da Placa do µC

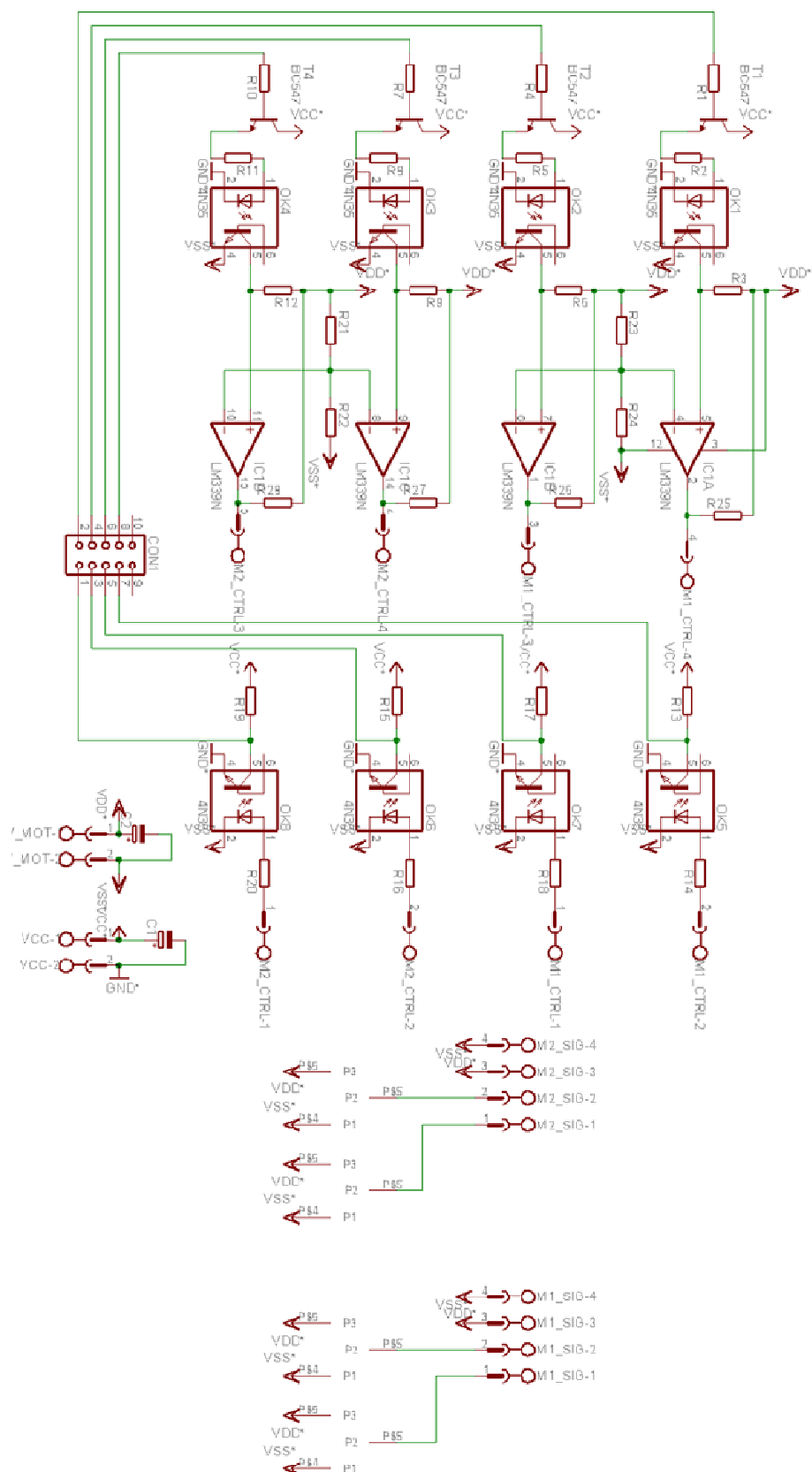


Fig. 79: Circuito da Placa de Isolamentos

### Anexo.3 Ligações Eléctricas do Sistema Triaxial Clássico

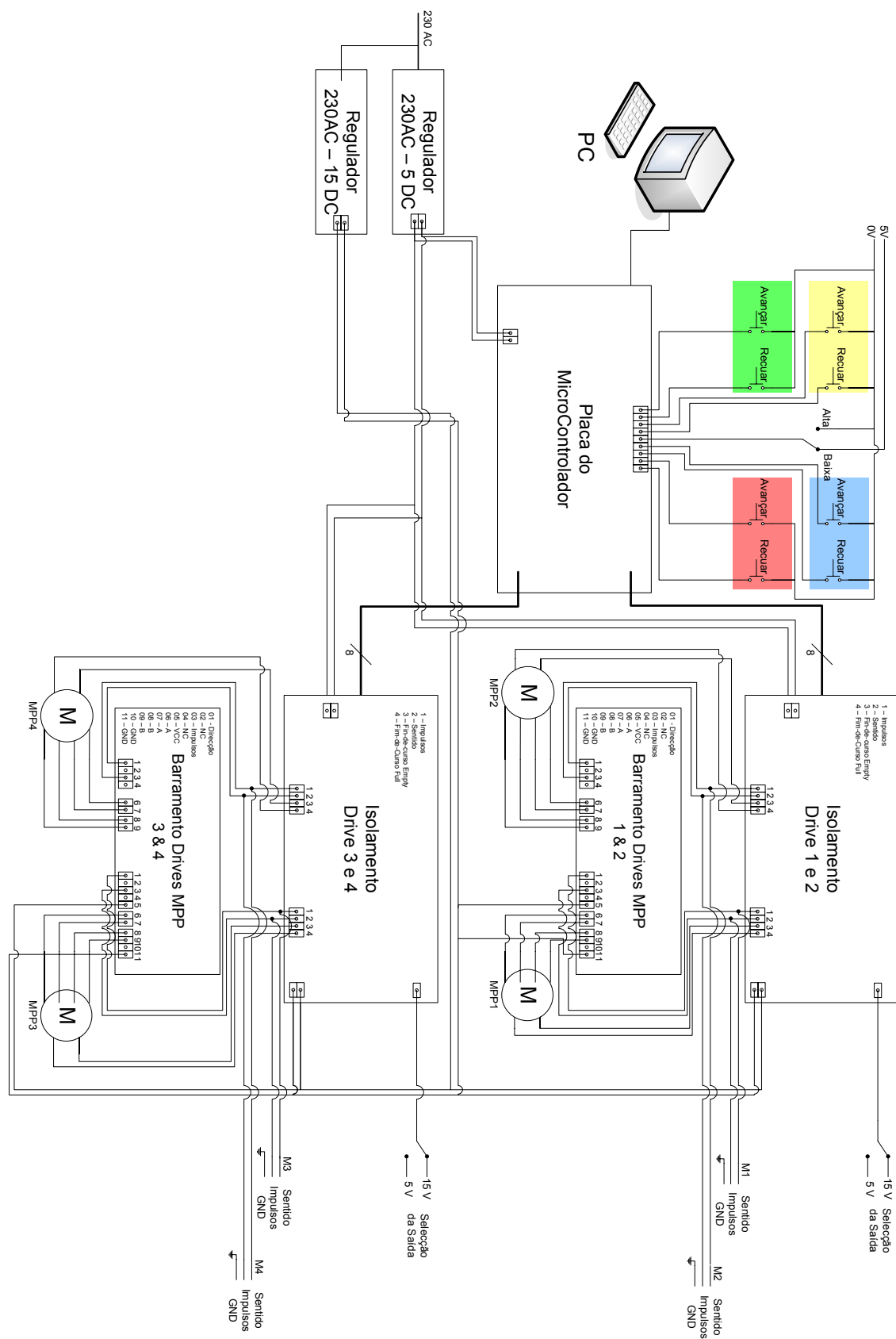


Fig. 80: Circuito do Armário Eléctrico

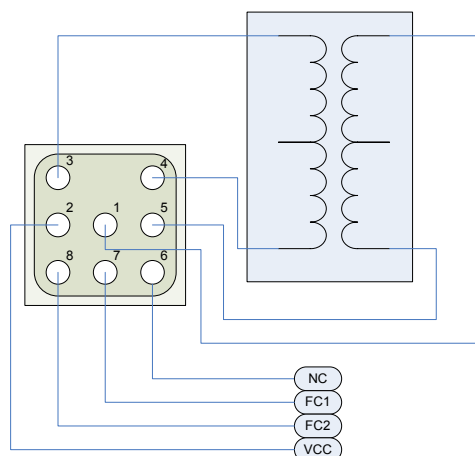


Fig. 81: Ligações das Fichas 'Harting D' (Fêmea) do Armário eléctrico

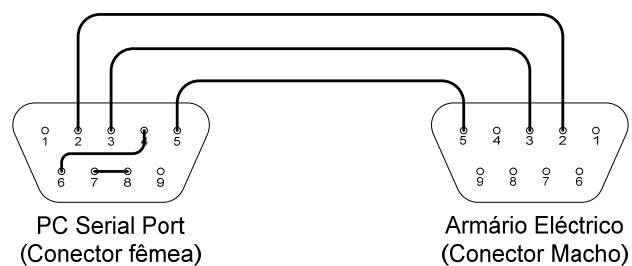


Fig. 82: Fig. 83: Ligações RS232 entre o Armário e o PC

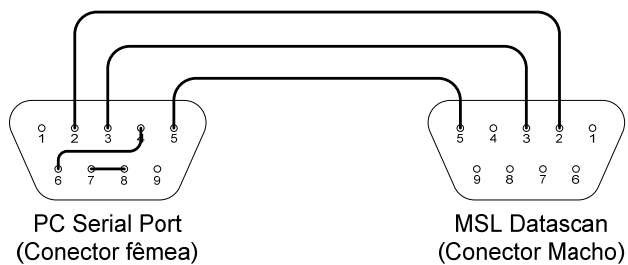


Fig. 83: Ligações RS232 entre o Datascan e o PC